



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

### НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ

**Михеев О.В., Мощенко А.И., Дорошева Д.С., Ошкин А.Е.**  
Оценка влияния вибраций конструкции КА ДЗЗ на качество видеоизображения съемочной оптико-электронной аппаратуры ..... 3

### РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Бокшанский В.Б., Тарасов В.В.**  
Принципы построения высокоточной прицельной системы с переменным полем зрения ..... 7

### ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

**Власенко О.В.**  
Применение методов оптической рефлектометрии для метрологического исследования отражающей поверхности облегченного крупногабаритного космического астрономического зеркала ..... 11

**Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Семенов А.П., Денисов Д.Г., Наговицын В.В., Дмитриев И.В., Мартынова Д.К., Погonyшев А.О., Сулейманов Г.М., Устинов Д.В.**  
Изготовление облегченных осевых и внеосевых астрономических и космических зеркал со сферическими и асферическими поверхностями ..... 15

### ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

**Подобрянский А.В., Глухов Ю.А., Майдашева Д.А.**  
К вопросу обработки сферических линз ..... 28

**Подобрянский А.В., Майдашева Д.А., Григорьева А.А.**  
К вопросу отечественного оптического станкостроения ..... 35

**VÜHLER оптико-механическим заводам** ..... 39

**Поздняков А.А.**  
Научная работа 3-й роты войск ВКО за 2016 – 2017 годы ..... 43

**Зубков Г.А.**  
Методика расчета баллистических характеристик при продольном сбалансированном движении неуправляемой ракеты с учётом влияния ветра ..... 51

**Круглов Б. В., Поллак А. А.**  
Применение линейного программирования, как способ импортозамещения режущего инструмента ..... 57



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)

<b>Був Д.С.</b> Исследование возможности утечки информации через мультимедийный интерфейс HDMI по каналу ПЭМИН .....	67
<b>Родионов А.Д., Круглов Б.В.</b> Энергетический расчет лазерного измерителя скорости и направления ветра .....	72
<b>Самбаров Г.Е.</b> Особенности движения малых тел солнечной системы, попавших в околосолнечное пространство, на примере астероидов 2011 CQ1 и 2011 MD .....	78
<b>Остроумов И.С.</b> Разработка автоматического анализатора теплотехнических характеристик топливных газов с последовательно подключенным турбулентным дросселем .....	85
<b>Коньшин В.И. Жаргалов Б.И. Литвинов С.А.</b> Многомодовый моноимпульсный рупорный облучатель антенного устройства канала приема информации, передачи команд и сопровождения КА земной станции спутниковой связи .....	91
<b>Пушкин К.А.</b> Разработка программного комплекса для расчета и прогнозирования ЭМИ передающих радиотехнических объектов СПРН в интересах оценки экологической безопасности .....	99
<b>Четырин И.В.</b> Расчет показателей состояния информационной безопасности критически важных объектов .....	103
<b>Шуваев И.Н.</b> Проведение динамических полунатурных испытаний для определения точностных характеристик приборов с использованием одноосного прецизионного поворотного стола Autronic 1120S .....	109
<b>ИСТОРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
Вехи жизни Александра Ивановича Гоева .....	117

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ КА ДЗЗ НА КАЧЕСТВО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ СЪЕМОЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

МИХЕЕВ О.В., МОЩЕНКО А.И., ДОРОШЕВА Д.С., ОШКИН А.Е.

Федеральное государственное унитарное предприятие

Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева

E-mail: salut@khrunichev.com

*Рассмотрено влияние механических вибраций конструкции КА ДЗЗ, создаваемых двигателями-маховиками системы управления КА, на оптико-электронную съёмочную аппаратуру. Для одного из вариантов компоновочной схемы КА класса «Обзор-О» приведены результаты исследований по влиянию вибрационных возмущений на показатель качества съёмки в форме пространственного разрешения на местности.*

**Ключевые слова:** оптико-электронная аппаратура, функция передачи модуляции, двигатели-маховики, оптико-электронный тракт, пространственное разрешение.

В ходе орбитального полета КА ДЗЗ на него действуют возмущения, обусловленные работой исполнительных органов системы управления (СУ) КА и приводов солнечных батарей (СБ). Учитывая, что приводы СБ создают возмущения, несовместимые с режимом съёмки КА, практически на всех КА ДЗЗ на период сеанса съёмки производится «замораживание» работы приводов СБ. Поэтому, при отсутствии в съёмочной аппаратуре поворотных зеркал, единственным источником возмущений на борту КА в ходе съёмки являются возмущения, создаваемые работой двигателей-маховиков системы ориентации и стабилизации КА, обусловленные остаточной несбалансированностью роторов двигателей-маховиков и шумами в подшипниках роторов.

Ниже на примере одного из вариантов компоновочной схемы КА ДЗЗ класса «Обзор-О» рассмотрено влияние возмущений, создаваемых работой двигателей-маховиков (ДМ), на качество изображений съёмочной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА).

В соответствии с [1] одним из наиболее представительных показателей качества съёмки ОЭА является линейное разрешение на местности. Как показано в работах [1, 2] данный показатель определяется по стандартной трехшпальной мише через предельно разрешаемую пространственную частоту, которая в свою очередь находится из решения частотно-энергетического уравнения сквозного оптико-электронного тракта (ОЭТ), приведенного к картинной плоскости фотоприемного устройства (ФПУ) ОЭА.

Одним из основных членов, входящих в уравнение, является суммарная функция передачи модуляции (ФПМ) сквозного ОЭТ, характеризующая искажение видеосигнала во всех звеньях ОЭТ: оптическая система, фотоприемник, звено «смаза» изображения, атмосфера, звено анализирующей дискретизации.

В соответствии с рассматриваемой задачей влияние вибраций на искажение изображения оценивается через ФПМ звена «смаза» изображения за счет его сдвига. Для низких частот вибрации, при которых периоды колебаний  $t_v$  много больше времени экспозиции строки изображения  $t_s$  ( $t_v \gg t_s$ ) сдвиг изображения за время  $t_s$  можно считать линейным. Для этой области низкочастотных вибраций в соответствии с [2] ФПМ описывается выражением

$$T_{\text{вн}}(N) = \frac{\sin(\pi \cdot N \cdot S_{\text{вн}})}{\pi \cdot N \cdot S_{\text{вн}}},$$

где  $N$  – пространственная частота,  $\text{мм}^{-1}$ ,

$S_{\text{вн}}$  – величина линейного сдвига изображения, определяемая зависимостью

$$S_{\text{вн}} = L \cdot t_s \cdot \omega_{\text{вн}} \cdot 10^3, \text{ мм}, \quad (2)$$

в которой (с учетом размерностей):

$L$  – расстояние от центра масс КА до посадочной поверхности оптико-электронного модуля (ОЭМ) ОЭА, м;

$t_s$  – время экспозиции (считывания изображения строки), с;

$\omega_{\text{вн}}$  – угловая скорость колебания блока объектива от низкочастотных вибраций, рад/с.

Отметим, что суммарная ФПМ линейного сдвига в общем случае включает также составляющие, обусловленные движением КА на орбите (при отсутствии режима тангажного отслеживания) и низкочастотными ошибками стабилизации углового движения КА системой управления.

Для области высоких частот вибрационных колебаний математическое ожидание ФПМ за счет сдвига изображения описывается в соответствии с [2] выражением с использованием функции Бесселя

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{вн}}(N) = & [J_0(2 \cdot \pi \cdot N \cdot b_{\text{вн}})]^2 + \\ & + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ [J_n(2 \cdot \pi \cdot N \cdot b_{\text{вн}})]^2 \cdot \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot n \cdot v_{\text{вн}} \cdot t_s)}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot v_{\text{вн}} \cdot t_s} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $b_{\text{вн}} = \alpha_{\text{вн}} \cdot L \cdot 10$  – линейная амплитуда смещения посадочной поверхности ОЭМ с размещенным в нем ФПУ за счет высокочастотных вибрационных колебаний, мм;

$\alpha_{\text{вн}}$  – амплитуда угловых высокочастотных вибрационных колебаний, рад/с;

$v_{\text{вн}} = \omega/2\pi$  – частота высокочастотных вибрационных колебаний, Гц.

Выражение (3) описывает наиболее общий вариант случайного сдвига в виде гармонического колебания, при котором фаза начала экспозиции подчиняется некоторому равномерному распределению на отрезке  $[0, 2\pi]$  и при этом отношение  $t_s/t_v$  времени экспозиции к периоду вибрационных колебаний является достаточно произвольным.

Относительное снижение пространственного разрешения при отсутствии и наличии вибраций описывается выражением

$$\frac{\Delta l_p}{l_{p0}} = \frac{l_{p\text{вн}} - l_{p0}}{l_{p0}} \quad (4)$$

где

$$l_{p0} = \frac{H}{2 \cdot N_o \cdot f_{\text{оэа}}}, \quad l_{p\text{вн}} = \frac{H}{2 \cdot N_{\text{вн}} \cdot f_{\text{оэа}}} \quad (5)$$

в которых:

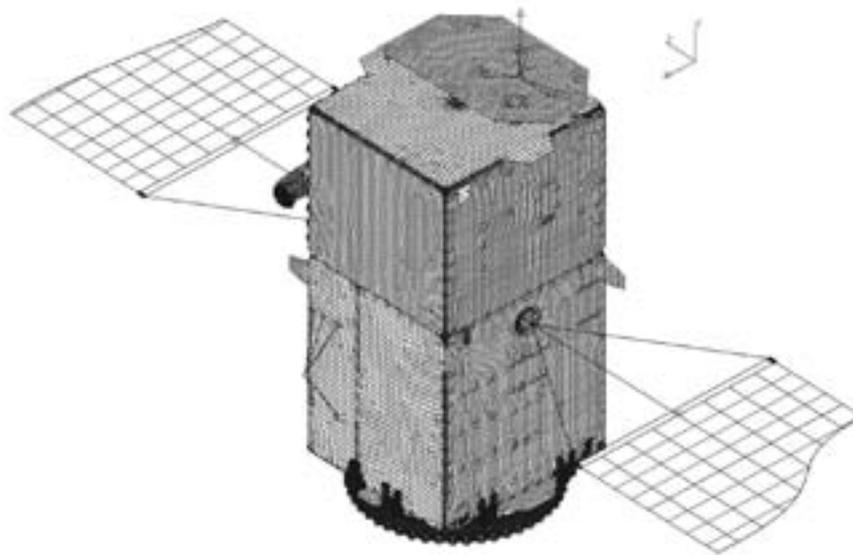
$N_o, N_{\text{вн}}$  – решения (предельно разрешаемые пространственные частоты) частотно-энергетического уравнения сквозного оптико-электронного тракта, приведенного к картинной плоскости ФПУ ОЭМ ОЭА и имеющего вид [2]

$$0.227 \cdot \text{SNR}_{N=0} \cdot T_{\Sigma}(N) = N \cdot 10^{-3} \cdot (d_x \cdot d_y)^{0.5} \quad (6)$$

для случаев соответственно отсутствия  $T_{\Sigma}(N) = T_{\Sigma 0}$  и наличия

$T_{\Sigma}(N) = T_{\Sigma \text{вн}}$  вибраций. В формулах (5) и (6) обозначено:

$H$  – высота орбиты (принят случай плановой съемки в надир);



**Рисунок 1.**  
**Конечно-элементная модель КА ДЗЗ**  
(солнечные батареи показаны частично)

$SNR_{N=0}$  – отношение сигнал/шум на нулевой пространственной частоте (т. е. определенное по функции Хэвисайда);

$d_x, d_y$  – шаг решетки ФПУ по осям  $x$  и  $y$ .

Далее, для одного из вариантов оснащения КА ДЗЗ оптико-электронной съемочной аппаратурой среднего разрешения и сформированного для этого варианта конструктивного облика КА с использованием метода конечных элементов и программ MSC/NASTRAN и MSC/PATRAN были проведены расчеты микровибраций в полете конструкции КА в месте установки ОЭМ ОЭА от возмущений, создаваемых работой ДМ.

Использованная для расчетов конечно-элементная модель КА представляет собой подробную динамическую модель аппарата в конфигурации этапа орбитального полета с раскрытыми солнечными батареями (рис. 1).

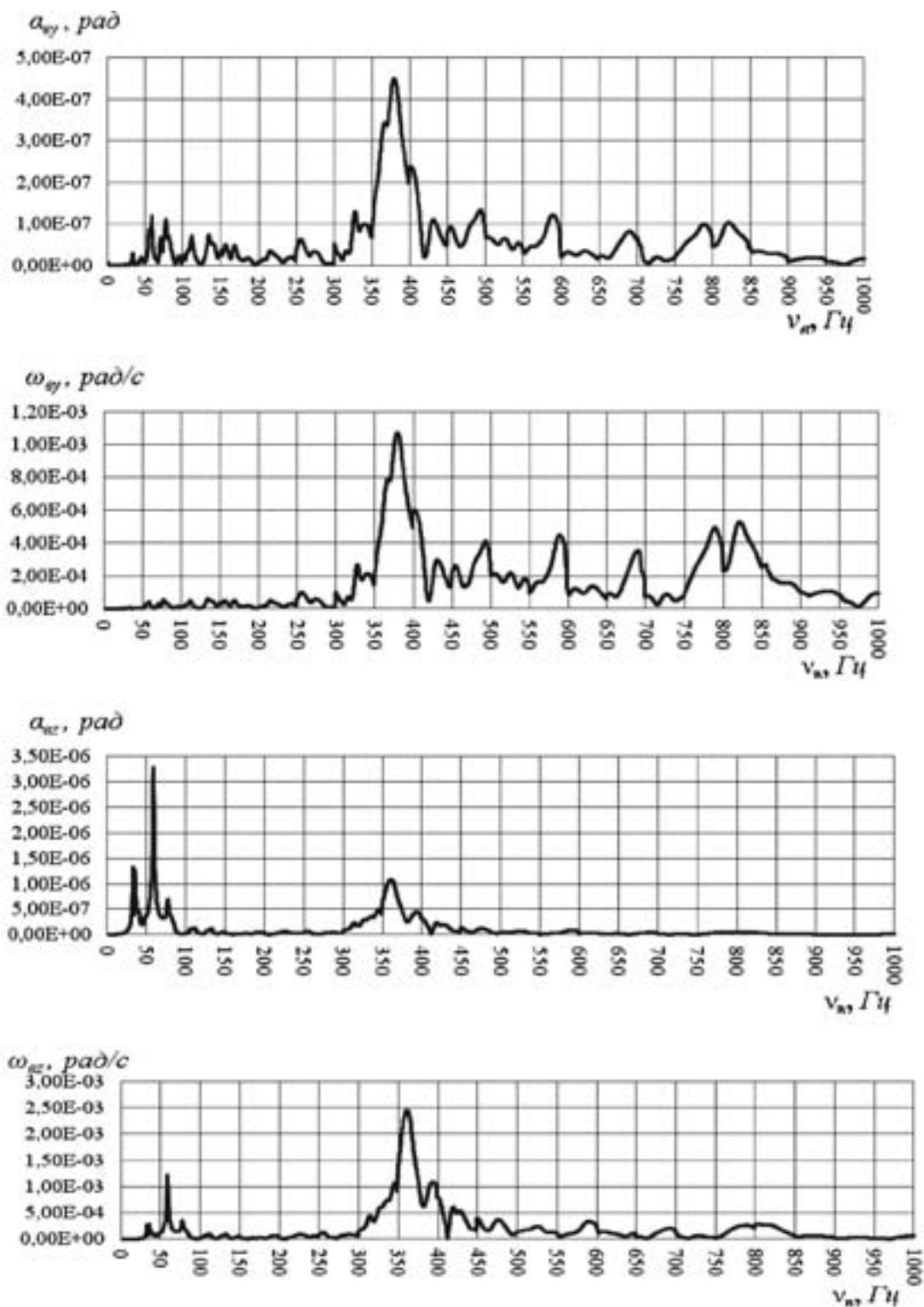
Общее количество конечных элементов в модели – около 167000. Корпус и солнечные батареи КА представлены оболочечными и балочными элементами. Навесная аппаратура КА задана точечными массовыми элементами с учетом положения центров масс аппаратуры.

Исходными данными для расчета динамических возмущений ОЭМ ОЭА от работы ДМ являлись величины виброускорений посадоч-

ных мест ДМ для различных частот вращений ротора и диапазонов частот вибраций.

На КА установлены 4 двигателя-маховика. Каждый ДМ создает динамические силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, лежащих в плоскости вращения ДМ. Причем, эти силы имеют разрыв по фазе в 90°. Расчет велся для варианта незакрепленной конструкции (этап орбитального полета). Прикладывалась нагрузка, меняющаяся по частоте с учетом вышеописанных особенностей работы ДМ. При этом принято, что до некоторой максимальной частоты вращения ДМ возмущения создаются за счет дисбаланса масс ДМ, после этой частоты возмущения обусловлены шумами подшипников роторов ДМ. Результаты расчета представлялись в виде зависимости углов и угловых скоростей поворота ОЭМ ОЭА в зоне его установки.

На рис. 2 приведены графики зависимости угла поворота  $\alpha_g$  и угловой скорости  $\omega_g$  вибрационных колебаний корпуса ОЭМ ОЭА от частоты вынужденных вибраций в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. Графики даны для угловых колебаний вокруг связанной оси КА ОУ, совпадающей с вектором скорости (реализуются линейные сдвиги изображения вдоль линейки ФПУ) и вокруг связанной оси КА ОZ (реализуются линейные сдвиги



**Рисунок 2.**  
*Зависимости углов  $a_{\omega}$  и угловых скоростей  $\omega_{\omega}$  поворотов корпуса ОЭМ ОЭА  
 вокруг осей Y и Z от частоты вибраций*

изображения поперек линейки ФПУ). Как видно из графиков рис. 1 имеется 3 пика вибраций в окрестностях частот  $\sim 50, 400$  и  $800$  Гц. Для ОЭА среднего разрешения на уровне 7-8 м время экспозиции строки изображения  $t_s$  составляет  $\sim 1$  мс.

Поэтому, для области вибраций с частотой  $\sim 50$  Гц период колебаний  $t_e \gg t_s$  и расчет ФПМ проводился по формуле (1). Для высокочастотных вибраций с частотами  $\nu_{ee} > 400$  Гц для расчета ФПМ использовалось выражение (3). Последовательность расчетов с применением указанных выше формул (1 – 6) была следующей.

Для принятых фотометрических характеристик ОЭА (в качестве прототипа взята аппаратура среднего разрешения с ФПУ в виде однострочной линейки) и условий наблюдений (контраст миры 0,2, съемка в надир с  $H=700$  км, зачетный угол Солнца  $30^\circ$ ) определялось отношение сигнал/шум  $SNR_{N=0}$  на нулевой пространственной частоте.

Далее находилась суммарная ФПМ  $T_{\Sigma 0}(N)$  для сквозного ОЭТ с учетом сомножителей ФПМ атмосферы, оптики, ФПУ, ошибок стабилизации КА, но без учета ФПМ вибрационной составляющей. Решением уравнения (6) определялась предельно разрешаемая пространственная частота  $N_0^*$  и затем по (5) находилось значение разрешения  $l_{po}$  без учета вибраций. Затем по формулам (1) и (3) определялись составляющие ФПМ для низкочастотных и высокочастотных вибраций. Значения углов и угловых скоростей вибраций выбирались максимальными, соответствующими пикам значений на графиках рис. 1. Полученные ФПМ добавлялись в виде сомножителей в суммарную ФПМ  $T_{\Sigma 0}(N)$  сначала для ФПМ области спектра низкочастотных вибраций и затем области спектра высокочастотных вибраций. Для каждого из этих случаев решалось частотно-энергетическое уравнение (6), находились в соответствии с (5) пространственные разрешения  $l_{pvn}$  и  $l_{pvv}$  и в соответствии с (4) относитель-

ные снижения разрешения при наличии низкочастотных и высокочастотных вибраций. Расчеты дали следующие результаты. При отсутствии вибраций и заданных значениях характеристик ОЭА и условиях наблюдения предельно разрешаемая пространственная частота  $N_0^*$ , полученная из решения (6), составила  $58 \text{ мм}^{-1}$ , а полученное из решения (5)  $l_{po} = 7,5$  м. Добавление к суммарной ФПМ  $T_{\Sigma 0}(N)$  сомножителя ФПМ за счет низкочастотных вибраций практически не изменили разрешения, т.е.  $l_{pvn} \approx l_{po}$ . В то же время высокочастотные вибрации хоть и незначительно, но повлияли на суммарную ФПМ и соответственно на  $l_{pve}$ . Так, предельно разрешаемая пространственная частота, полученная из решения уравнения (6) с учетом ФПМ высокочастотных вибрации, составила  $\sim 56 \text{ мм}^{-1}$ , при этом в соответствии с (5) получено  $l_{pve} \approx 7,7$  м, а относительное ухудшение разрешения в соответствии с (4) составило  $\sim 3$  %. Такое ухудшение разрешения можно, по-видимому, считать вполне допустимым и сделать вывод о том, что выбранные конструктивно-компоновочная схема КА, применяемые материалы конструкции и способы крепления элементов КА, включая крепление оптико-электронного модуля ОЭА, являются обоснованными и обеспечивают достаточно эффективное гашение вибраций, создаваемых работой ДМ, в зоне установки оптико-электронного модуля.

#### Список литературы:

1. Батраков А.С., Анатольев А.Ю. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. 2000. Т67. №7. С. 92-99.
2. Волков О.В., Михеев О.В. Методика априорной оценки линейного разрешения на местности съемочной аппаратуры КА ДЗЗ «Монитор-Э» // Научно-технические разработки КБ «Салют» 2009-2011 г.г. вып. 3. М.: Машиностроение-Машиностроение-полет, 2012. С. 76-87.

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

## ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ПРИЦЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ

БОКШАНСКИЙ В.Б., ТАРАСОВ В.В.

ОАО «ЦНИИ «ЦИКЛОН», г. Москва

E-mail: vassily69@mail.ru

*Рассмотрен метод построения высокоточной ОЭП на основе матричного приемника и панкратического объектива с плавным изменением углового поля зрения. Для вычисления поправок текущего положения линии визирования предложено использовать встроенный коллиматор и тестовое изображение с последующей цифровой обработкой в реальном масштабе времени.*

**Ключевые слова:** Измерение люфтов и фокусных расстояний, способы вычисления динамических ошибок, работоспособность коллиматорной схемы.

При построении высокоточной прицельной системы существует проблема определения текущего положения оптической оси объектива, а также текущего увеличения. Дело в том, что подвижные компоненты объектива с переменным фокусным расстоянием имеют люфт, причем переменный и зависящий от температуры и степени износа механических деталей. Кроме того, часто важно также знать и текущее фокусное расстояние, а значит – оптическое увеличение. Встроенные в объектив датчики не позволяют определять указанные величины с требуемой точностью (единицы угловых секунд). В результате, при движении компонентов объектива линия визирования описывает в пространстве случайную кривую, причем с довольно большим среднеквадратическим отклонением (вплоть до десятков пикселей в эквиваленте). С этой целью предлагается дополнить оптический канал на основе матричного приемника и панкратического объектива внутренним коллиматором, формирующим специальное тестовое изображение по команде встроенной системы управления.

Функциональная схема доработанного канала представлена на рис. 1.

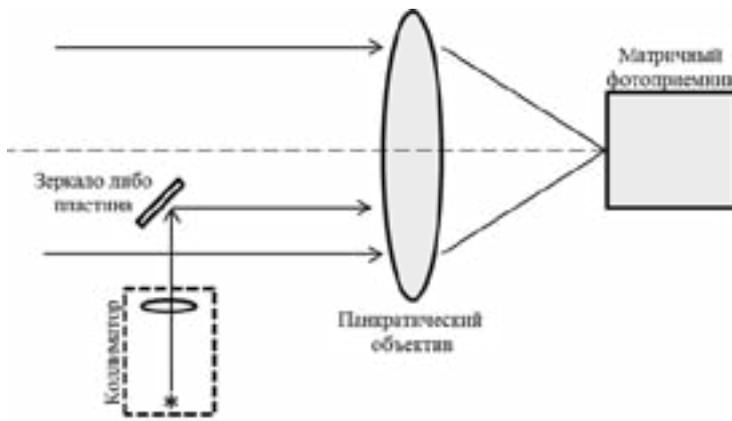
У такого решения есть следующие преимущества:

1. Вычисление динамических ошибок положения оптической оси канала в реальном масштабе времени.
2. Контроль функционирования канала без применения отдельной КПА.
3. Установка требуемого увеличения канала и реализация автофокусировки в случае наблюдения за мало контрастным изображением.

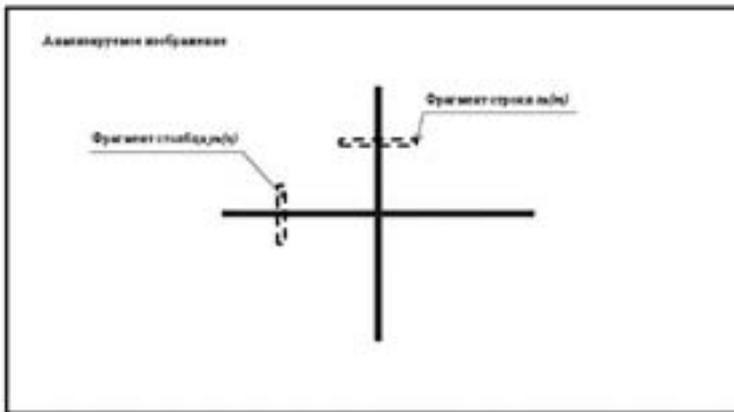
При реализации алгоритма вычисления положения оптической оси канала используются как датчики, входящие в состав объективов, так и встроенные коллиматоры.

Первичная грубая обработка осуществляется по сигналам датчиков объективов. Для этого датчики предварительно калибруются. Датчики положения являются недостаточно точными, что требует вторичной, более точной синхронизации.

Вторичная синхронизация основана на использовании сигнала коллиматора. Коллиматор формирует изображение креста (наибо-



**Рисунок 1.**  
**Функциональная схема канала со встроенным коллиматором**



**Рисунок 2.**  
**Вид тестового изображения**

лее удобная для обработки форма тестового изображения, см. рис. 2) на фоне регистрируемых изображений. Положения центра креста  $x_k$  и  $y_k$  указывает на положение оптической оси приемного канала, а ширина линий креста  $\Delta x_k$  и  $\Delta y_k$  – на текущее увеличение (оптический ZOOM).

Данная процедура содержит две стадии:

- выделение изображения креста и преобразование его в бинарный вид;

- вычисление параметров  $(x_k, y_k)$  и  $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ ;

Процесс определения заканчивается формированием результирующих кадров, например  $x_{TB}(m,n)$ , отличающегося от исходного несколько меньшими размерами по обеим координатам и смещенного на  $(x_k, y_k)$  относительно центра исходного кадра.

Выделение изображения креста коллиматора основано на сравнении фрагментов двух кадров: активного  $x^A(m,n)$  (светодиод коллиматора включен) и пассивного  $x^П(m,n)$  (све-

одиод выключен). Для упрощения расчетов, в обоих кадрах выбираются одни и те же фрагменты: центральная часть строки  $x_g(m)$  и центральная часть столбца  $y_g(n)$ .

При этом размеры фрагментов по строке и столбцу одинаковые и на небольшую величину превышающие предельную толщину формируемого креста (ориентировочно 50 пикселей для оптимального случая в режиме максимального увеличения – узкого поля зрения). При этом величина оптического увеличения определяется по формуле:

$$\beta = \frac{f'_o}{f_k},$$

где  $f'_o$  – текущее фокусное расстояние панхроматического объектива,  $f_k$  – фокусное расстояние коллиматора.

Далее, производится вычитание фрагмента пассивного кадра из соответствующего фрагмента активного с последующей пороговой обработкой:

$$B_x(m) = \begin{cases} 100, & \text{если } x_B^A(m) - x_B^П(m) \geq U_{\text{пор}}, \\ 0, & \text{если } x_B^A(m) - x_B^П(m) < U_{\text{пор}}. \end{cases}$$

– для строки и

$$B_y(n) = \begin{cases} 100, & \text{если } y_B^A(n) - y_B^П(n) \geq U_{\text{пор}}, \\ 0, & \text{если } y_B^A(n) - y_B^П(n) < U_{\text{пор}}. \end{cases}$$

где  $B_x(m)$  и  $B_y(n)$  – бинарные изображения выбранных фрагментов,  $U_{\text{пор}}$  – пороговые значения. Теоретически можно принять  $U_{\text{пор}} = 3\sigma_{ш}$ , где  $\sigma_{ш}$  – СКО шума.

Далее, методами бинарной морфологии вычисляются размер  $(\Delta x_k, \Delta y_k)$  и серединные координаты  $(x_k, y_k)$  полученных бинарных одномерных множеств  $B_x(m)$  и  $B_y(n)$ .

Именно они и являются искомыми параметрами креста. По величине  $(\Delta x_k, \Delta y_k)$  определяется требуемое увеличение и с помощью итерационного алгоритма путем управлением двигателями объективов подбираются требуемые значения. Координаты  $(x_k, y_k)$  позволяют определить линейные смещения оптической оси.

Необходимо отметить, что данный алгоритм выполняется однократно после каждого изменения фокусного расстояния.

Необходимые ресурсы вычислителя – толь-



**Рисунок 3.**

*Внешний вид изготовленного телевизионного канала с установленным коллиматором*

ко арифметические и логические операции. Внешний буфер памяти не требуется. Отдельные параметры алгоритма (размер и положение фрагментов строки и столбца, пороговое значение) подбираются экспериментальным путем.

Таким образом, предложенный метод позволяет значительно повысить точность определения положения оптической оси панкратического объектива, а значит, точность определения координат наблюдаемого объекта и точность прицеливания. При этом его практическая реализация является достаточно простой.

В ОАО «ЦНИИ «Циклон» был практически реализован вышеописанный метод в составе приемного канала как видимого диапазона, так и ИК диапазона, содержащего объектив-трансфокатор. На рис. 3 представлена фотография изготовленного телевизионного канала.

На рис. 4 и 5 показаны изображения, формируемые изготовленным телевизионным каналом.

Анализ рисунков позволяет заключить, что даже при небольшой мощности светодиода коллиматора изображения коллиматорного креста выделяется достаточно уверенно. Кроме того, при изменении фокусного расстояния изображение креста меняет свой масштаб и положение в кадре, что, как было показано выше, позволяет определить текущее оптическое увеличение с высокой точностью, а также положение оптической оси.

Таким образом, проведенные в ОАО «ЦНИИ «Циклон» практические исследования полностью подтвердили работоспособность и эффективность коллиматорной схемы коррекции ошибок при прицеливании с использованием объектива-трансфокатора.



**а)**



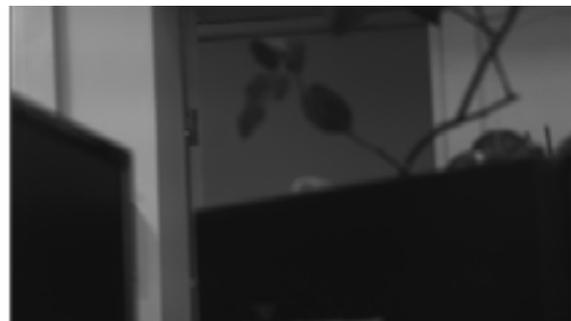
**б)**

**Рисунок 4.**

*Изображения, полученные в широком угловом поле с включенным (а) и выключенным (б) коллиматором*



**а)**



**б)**

**Рисунок 5.**

*Изображения, полученные в узком угловом поле с включенным (а) и выключенным (б) коллиматором*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЛЕГЧЁННОГО КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

ВЛАСЕНКО О.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт астрономии Российской академии наук, г. Москва

E-mail: vlasenko@inasan.ru

*Метод интегрального рассеяния, метод дифференциального рассеяния при создании зеркал. Измерения функции эталонов и их использование при расчетах, количественная оценка вклада рассеянного излучения.*

**Ключевые слова:** способы измерения рассеянного излучения, схемы и углы падения, практическое использование результатов.

### ВВЕДЕНИЕ

Распространённым способом метрологического исследования шероховатых оптических поверхностей является оптическая рефлектометрия, в которой измеряется мощность рассеянного излучения, нормированная на мощность падающего излучения: интегральная мощность  $P_{TIS}$  в методе полного интегрального рассеяния (total integral scattering (TIS)), либо угловая мощность  $P_{ARS}$  (или  $P_S$ ) в методе дифференциального (углового) рассеяния (angular resolved scattering (ARS)) [1].

ИНАСАН совместно с предприятиями-исполнителями ведёт работы по созданию главного зеркала (ГЗ) диаметром 1,7 метра для телескопа Т-170М, входящего в состав комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ». ГЗ изготавливается из астроситалла на АО ЛЗОС. Отражающая в спектральном диапазоне 115 – 600 нм поверхность ГЗ формируется путём нанесения двухслойного функционального покрытия  $Al+MgF_2$  на рабочую поверхность зеркала методом резистивного испарения.

Д. Харви (James E. Harvey) с коллегами утверждают, что для солнечного двухзеркального ультрафиолетового телескопа рассеяние света от отражающих поверхностей главного и вторичного зеркал иногда доминирует над геометрическими абберациями и дифракционными эффектами в деградации качества изображения [2].

ФРТ (функция рассеяния точки) или PSF (point spread function) в фокальной плоскости телескопа будет являться наложением четырёх функций мощности излучения:

зеркально-зеркальная компонента –  $A_{ГЗ} A_{ВЗ}$   
рассеянно-зеркальная компонента –  $B_{ГЗ} A_{ВЗ}$   
зеркально-рассеянная компонента –  $A_{ГЗ} B_{ВЗ}$   
рассеянно-рассеянная компонента –  $B_{ГЗ} B_{ВЗ}$

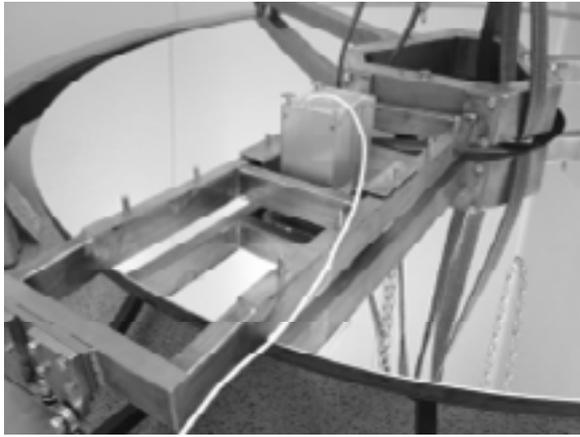
где  $A = \exp(-(4\pi \cos\theta_i \sigma_{rel}/\lambda)^2)$  (1)

$B = I - A - P_{TIS}$  (интегральная мощность рассеянного излучения)

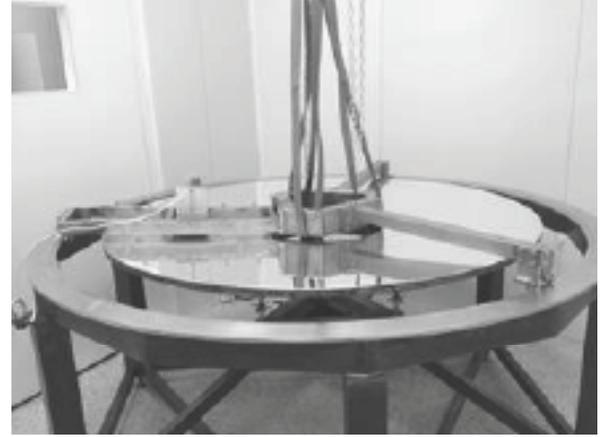
$\theta_i$  - угол падения излучения

$\sigma_{rel}$  - релеевская среднеквадратичная шероховатость

$\lambda$  - длина волны падающего излучения.



**Рисунок 1.**  
Измерительный прибор ИВМН-1,  
установленный на поворотной раме  
технологического приспособления



**Рисунок 2.**  
Общий вид приспособления с макетным образцом  
главного зеркала телескопа при контроле  
 $P_{TIS}$  методом полного интегрального рассеяния

### МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ

В настоящее время при проведении ПСИ ГЗ после нанесения двухслойного функционального покрытия  $Al+MgF_2$  на рабочую поверхность зеркала для контроля рассеянного излучения применяется метод полного интегрального рассеяния. Технологическое приспособление обеспечивает регулировку и фиксацию положения ГЗ по шести степеням свободы и перемещение измерительного прибора ИВМН-1, использующего фотометрическую сферу и позволяющего измерять отношение интегральной мощности рассеяния  $P_{TIS}$  к мощности падающего излучения  $P_i$  на отдельных зонах рабочей поверхности ГЗ. Прибор ИВМН-1 может устанавливаться на четыре посадочных места на поворотной раме, и имеет регулировки по угловому положению относительно двух осей и по высоте. На рис. 1 и 2 показаны прибор ИВМН-1, установленный на поворотной раме технологического приспособления и общий вид приспособления с макетным образцом главного зеркала телескопа.

### МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ

Существует большое разнообразие теоретических моделей, связывающих дифференциальное (угловое) рассеяние излучения и структурные свойства отражающей поверхности. Функция дифференциального рассеяния излучения

$ARS(\theta_s)$  определяется, как отношение мощности рассеянного излучения в единичном телесном угле  $\Delta P_s(\theta_s)/\Delta\Omega_s$  к мощности падающего излучения  $P_p$ , или как произведение двунаправленной функции распределения отражения (Bidirectional Reflection Distribution Function)  $BRDF(\theta_s)$  на косинус угла дифференциального рассеяния  $\theta_s$  [3].

$$ARS(\theta_s) = \Delta P_s(\theta_s) / (\Delta\Omega_s P_i) = BRDF(\theta_s) \cos\theta_s \quad (2)$$

$$BRDF(\theta_s) = (16 \pi^2 / \lambda^4) \cos\theta_i \cos\theta_s Q PSD(f) \quad (3)$$

где

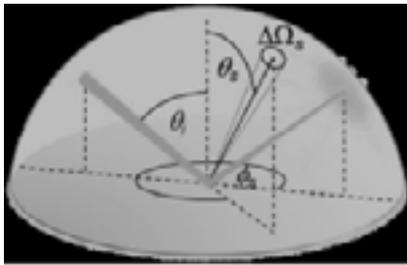
$PSD(f)$  – функция спектральной плотности мощности, описывающая статистические свойства шероховатости поверхности

$Q$  – оптический фактор, который содержит информацию о рассеивающей геометрии, диэлектрических константах и параметрах поляризации поверхности

$f = (\sin\theta_i - \sin\theta_s) / \lambda$  – пространственная частота

$\lambda$  – длина волны падающего излучения.

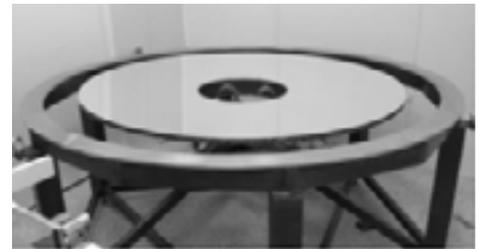
Фраунгоферским институтом прикладной оптики и точного машиностроения IOF (г. Йена, Германия) разработан компактный прибор HOROS-S для определения 3D двунаправленной функции распределения отражения BRDF, в качестве основы которого взят компактный оптический измеритель шероховатости поверхности HOROS [4].



**Рисунок 3.**  
Углы падения и дифференциального рассеяния в сферической системе координат



**Рисунок 4.**  
Прибор HOROS-S с манипулятором



**Рисунок 5.**  
Макетный образец главного зеркала телескопа, установленный на технологическое приспособление

На рис. 3 показаны угол падения  $\theta_i$  и угол дифференциального рассеяния  $\theta_s$  в сферической системе координат.

На рис. 4 показан прибор HOROS-S с манипулятором, который согласован с технологическим приспособлением (рис. 5).

На рис. 5 показан макетный образец главного зеркала телескопа, установленный на технологическое приспособление.

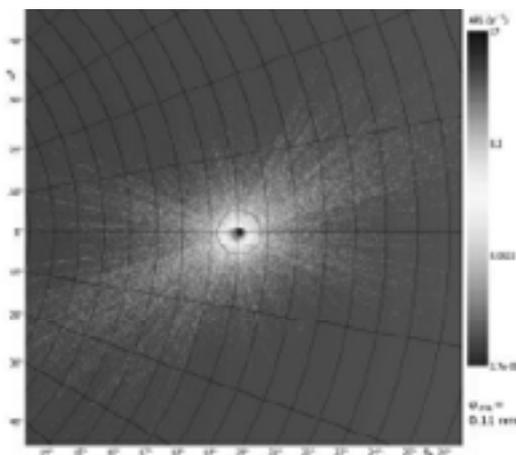
При инсталляции прибора HOROS-S были выполнены измерения функции ARS эталонов «чёрное стекло» (RG1000) без покрытия, «чёрное стекло» с покрытием Ti толщиной 200 нм, и измерения функции ARS и вычисления функции BRDF образцов свидетелей зеркала без покрытия и с нанесенным покрытием Al+MgF<sub>2</sub>.

На рис. 6 и 7 показаны результаты измерений ARS эталонов.

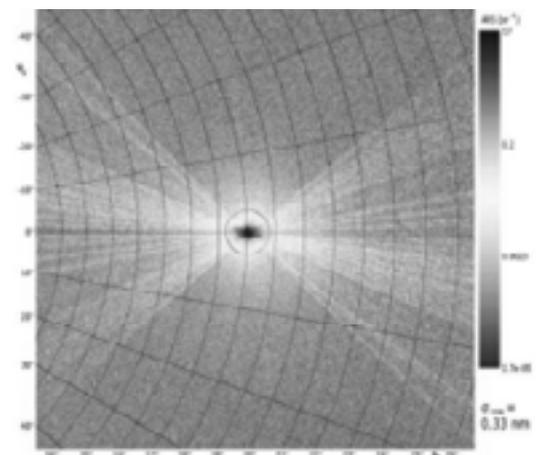
На рис. 8 и 9 показаны результаты измерений функции ARS и вычисления функции BRDF образца свидетеля зеркала без покрытия.

На рис. 10 и 11 показаны результаты измерений функции ARS и вычисления функции BRDF образца свидетеля зеркала с нанесенным покрытием Al+MgF<sub>2</sub>.

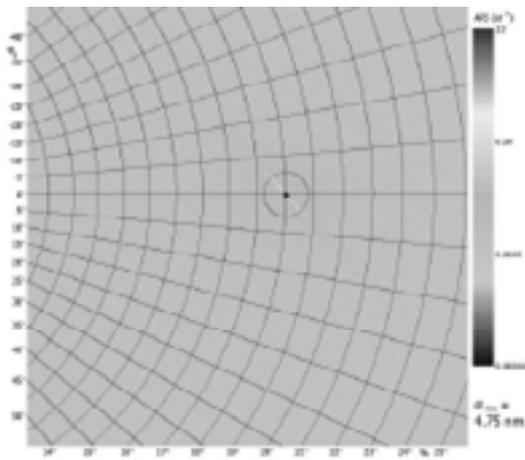
Результаты измерений, выполненные прибором HOROS-S могут быть использованы, как исходные данные для оптических расчётов с применением программного обеспечения Zemax и TracePro.



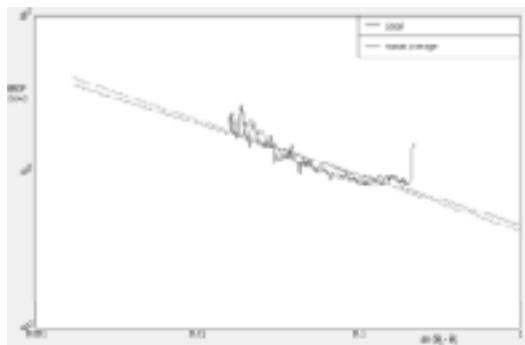
**Рисунок 6.**  
Измерения ARS эталона «чёрное стекло» без покрытия



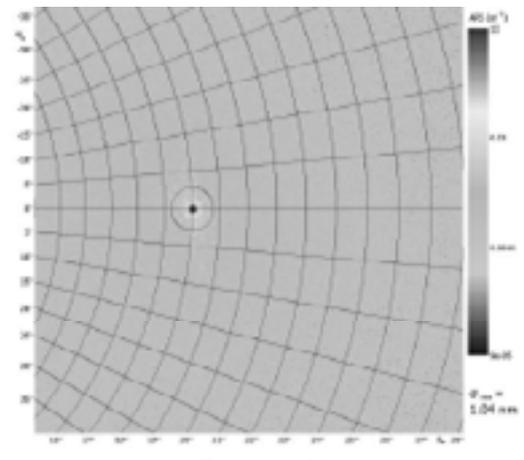
**Рисунок 7.**  
Измерения ARS эталона «чёрное стекло» с покрытием Ti толщиной 200 нм



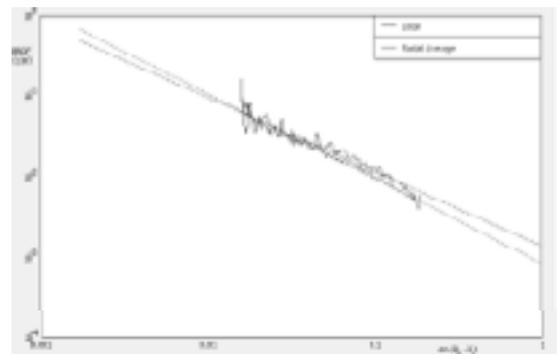
**Рисунок 8.**  
**Измерения ARS образца свидетеля зеркала без покрытия**



**Рисунок 9.**  
**Функция BRDF образца свидетеля зеркала без покрытия**



**Рисунок 10.**  
**Измерения ARS образца свидетеля зеркала с нанесенным покрытием Al+MgF<sub>2</sub>**



**Рисунок 11.**  
**Функция BRDF образца свидетеля зеркала с нанесенным покрытием Al+MgF<sub>2</sub>**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода дифференциального рассеяния позволит количественно оценить вклад рассеянного излучения от отражающих поверхностей главного и вторичного зеркал телескопа в деградацию качества изображения.

*Список литературы:*

1. Азарова В.В., Дмитриев В.Г., Лохов Ю.Н., Малицкий К.Н. Теория дифференциального и интегрального рассеяния лазерного излучения прецизионной поверхностью диэлектрика, Квантовая электроника, 30, № 4, (2000).
2. James E. Harvey, Narak Choi, Andrey Krywonos,

Gary Peterson, Marilyn Bruner. Image degradation due to scattering effects in two-mirror telescopes, Optical Engineering 49(6), 063202 (June 2010).

3. Sven Schröder, Marcus Trost, Tobias Herffurth, Alexander von Finck, Angela Duparré. Sophisticated light scattering techniques from the VUV to the IR regions, Proc. of SPIE Vol. 8495 84950V-7, (2013).

4. Sven Schröder, Marcus Trost, Tobias Herffurth, Angela Duparré. Using light scattering to investigate damage-relevant imperfections of surfaces, coatings, and bulk materials, Proc. SPIE 8786, Pacific Rim Laser Damage 2013: Optical Materials for High Power Lasers, 87860S (July 9, 2013); doi:10.1117/12.2020478, (2013).

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБЛЕГЧЕННЫХ ОСЕВЫХ И ВНЕОСЕВЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ СО СФЕРИЧЕСКИМИ И АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П., ДЕНИСОВ Д.Г.\*, НАГОВИЦЫН В.В.\*, ДМИТРИЕВ И.В.\*, МАРТЫНОВА Д.К.\*, ПОГОНЬШЕВ А.О.\*, СУЛЕЙМАНОВ Г.М.\*, УСТИНОВ Д.В.\*

АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино

\*Московский Государственный Технический Университет им.Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: lastro@lzos.ru

*В данной работе представлены различные варианты технологического процесса изготовления осевых и внеосевых асферических зеркал с облегчённой структурой: метод изготовления пары внеосевых зеркал из единой заготовки, метод изготовления единичного зеркала с использованием вспомогательных приспособлений и т.д. Рассматриваются особенности контроля данных поверхностей.*

**Ключевые слова:** астрономическая и космическая оптика, внеосевые асферические зеркала, облегчённые зеркала.

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области астрономии, космической и лазерной технологий в значительной мере стали возможны благодаря появлению новых высокоточных оптических наземных и космических систем. От качества изготовления оптических компонентов, входящих в эти системы, напрямую зависят возможности инструмента при проведении научных исследований. В связи с этим возросли требования к качеству и точности изготовления поверхностей оптических деталей, увеличился диапазон их габаритов, усложнилась форма оптических элементов.

Асферические облегчённые зеркала используются в астрономической оптике в составе систем наземного и космического базирования. Структура облегчения необходима для уменьшения веса детали, но в то же время зеркало в составе объектива должно сохранять форму рабочей поверхности и оптическое качество в процессе эксплуатации. Если это наземный инструмент, то система

разгрузки облегченного зеркала должна обеспечивать деформации оптической поверхности в допустимых пределах, в космических условиях зеркало должно принять форму, которая была получена в технологической разгрузке, имитирующей условия невесомости.

Особенность конструкции внеосевых зеркал состоит в том, что ось отражающей поверхности лежит за пределами центра детали или за пределами самой детали. Поэтому изготовление внеосевого асферического зеркала с точки зрения технологии обработки и контроля считается наиболее сложным технологическим процессом. Для создания таких изделий можно использовать различные технологические подходы [1-5].

Как правило, зеркала облегчаются с тыльной стороны выборками трапецидальной или треугольной формы. Наружный и внутренний края зеркала подкреплены ребрами жесткости. Облегчение зеркал может быть более 80% при условии сохранения требуемой жесткости данной конструкции.



*Рисунок 1.*

*Различная структура облегчения зеркала*

Технологически можно изготовить различную форму структуры облегчения зеркала. Пример таких структур приведен на рис. 1.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗЕРКАЛА СО СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И С НЕКРУГЛОЙ ФОРМОЙ ВНЕШНЕГО ПЕРИМЕТРА**

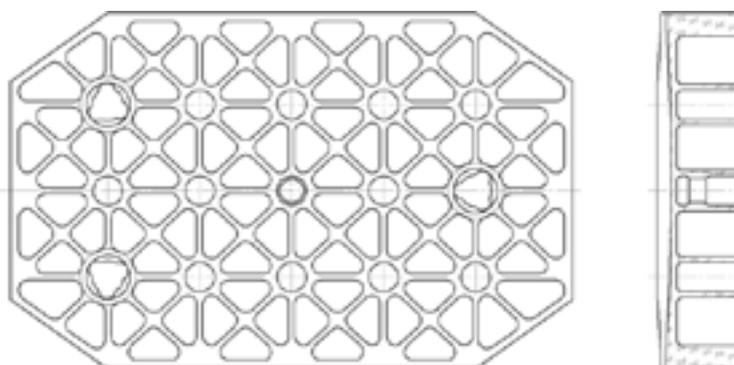
Для успешного решения задачи изготовления астрономического сферического зеркала нужно выбрать материал для данного оптического изделия. К материалам для крупногабаритных зеркал предъявляются следующие требования, обусловленные жесткими допусками (сотые доли микрометра) на соответствие поверхности зеркала расчетной форме и сохранения этой формы во времени:

- высокая сопротивляемость внешним воздействиям (комбинация физических свойств, обеспечивающая малые механические и температурные деформации);
- стабильность свойств и размеров во времени;
- высокий класс шероховатости полированной поверхности;

– малая плотность.

Идеального материала, отвечающего всем перечисленным требованиям, не существует. Однако, вследствие таких свойств как высокая изотропность, стабильность, полируемость, близкий к нулю коэффициент термического расширения, низкая микрошероховатость и т.д. - астроситалл является наилучшим выбором [6]. Ситалл – стеклокристаллический материал, полученный объемной кристаллизацией стекла. Термическая устойчивость ситалла позволяет изготавливать зеркала высочайшей степенью точности за гораздо более короткое время обработки, поскольку измерения можно производить не дожидаясь достижения термического равновесия. Твердость большинства ситаллов 6,5 – 7 единиц по Моосу, предел прочности на изгиб до 250 МПа. Для изготовления астрономических зеркал широко используется астроситалл СО-115М [6]. При создании мобильных конструкций оптических систем или систем космического базирования требуется выполнять облегчение зеркал, но при этом необходимо обеспечить условие сохранности деформаций зеркала в заданных пределах. Облегчение конструкции выполняется с помощью фрезерования ячеек с тыльной стороны зеркала. В отдельных случаях, для увеличения прочности конструкции к тыльной поверхности зеркала припаивается плоская покровная пластина из ситалла методом электроадгезионного соединения.

На рис. 2 показана конструкция монолитного зеркала с горизонтальным размером 660 мм, в котором для облегчения конструкции



*Рисунок 2.*

*Конструкция облегченного зеркала с ячейками облегчения*

выполнены полости с тыльной стороны зеркала (ячейки облегчения). Технология, существующая на сегодняшний день, обеспечивает минимальную ширину стенки между ячейками облегчения 4- 5 мм. Схема расположения и форма ячеек облегчения, приведенная на рис. 2, в данном случае позволяет произвести облегчение наиболее оптимальным образом.

На рис. 3 показана конструкция облегченного зеркала, в котором части слоистого зеркала из оптического ситалла соединяют между собой электроадгезионным способом. Суть электроадгезионного соединения (ЭАС) деталей из оптического ситалла СО-115М состоит в том, что при нагреве до высокой температуры в ситалле возникает электропроводность, что позволяет использовать электрическое поле для активизации процесса диффузии между контактирующими полированными поверхностями пластин [1]. Облегченное зеркало состоит из трех элементов, облегченного каркаса 2 и двух покровных пластин 1, 3 (рис. 3). Составляющие изделие пластины вырезают из монолитной заготовки. Или облегченное зеркало, как единое целое (1, 2) и к нему присоединяется покровная пластина (3). Создание замкнутой конструкции позволяет значительно повысить жесткость конструкции облегченного зеркала.

Для изготовления облегченной конструкции данного астрономического сферического зеркала применяется метод фрезерования

ячеек облегчения с тыльной стороны зеркала. Для изготавливаемого зеркала данная технология позволяет обеспечить все необходимые параметры, в том числе и весовые характеристики, полученная конструкция будет обладать достаточной жесткостью и стабильностью формы в космических условиях.

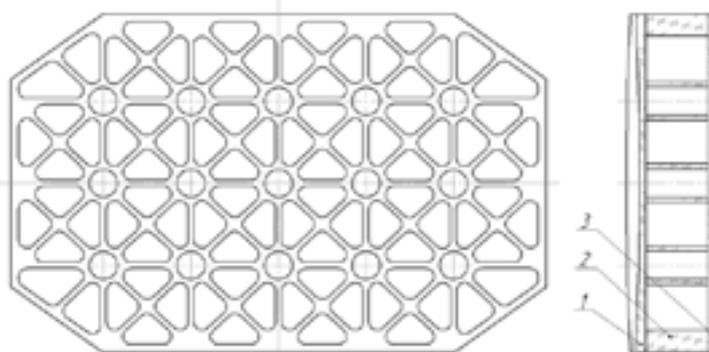
На рис. 4 приведен эскиз требуемого астрономического сферического зеркала, где показаны его основные параметры. К данному зеркалу предъявляются следующие требования:

- среднеквадратичное значение  $\sigma$  полной ошибки поверхности сферического зеркала в пределах рабочей световой зоны (РСЗ) размером 405x644 мм не должно быть более  $0.02\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  – длина волны He-Ne лазерного источника света интерферометрического средства контроля);
- отклонение радиуса кривизны зеркала от номинального значения не должно быть больше 1 мм;
- отклонение центра РСЗ зеркала от геометрического центра, определяемого габаритными размерами поверхностей, на которых расположена РСЗ, не более  $\pm 0,5$  мм.

На основании вышеперечисленных требований составляется технологический процесс изготовления требуемой оптической детали.

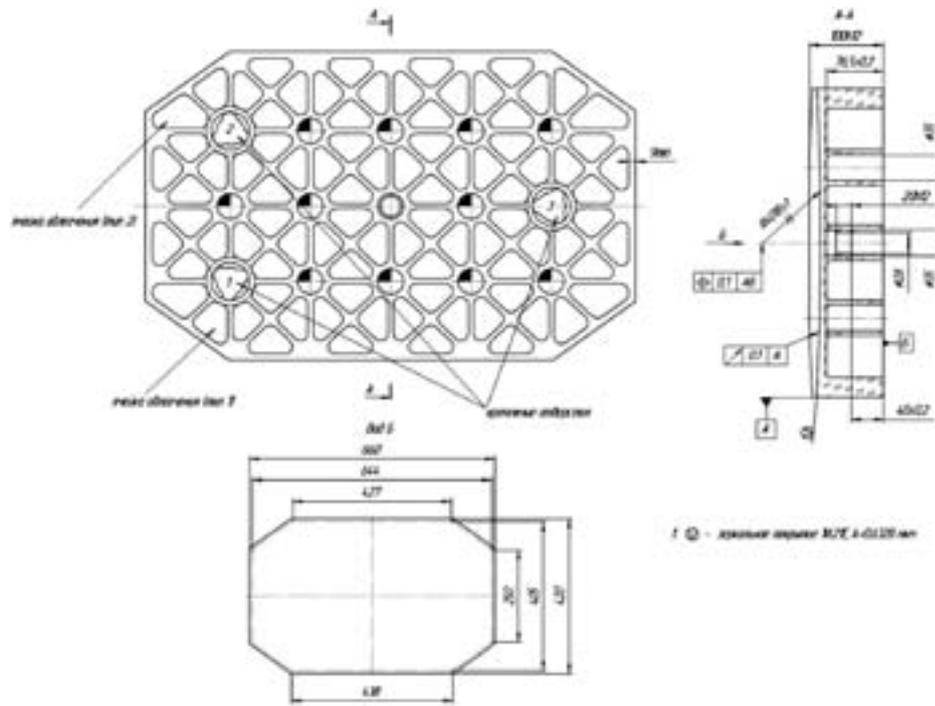
Зеркало контролируется в вертикальном стенде контроля.

Наиболее простой и достаточно эффективной разгрузкой для данного случая является разгрузка на мембранно-пневматической оправе, показанной на рис. 5.

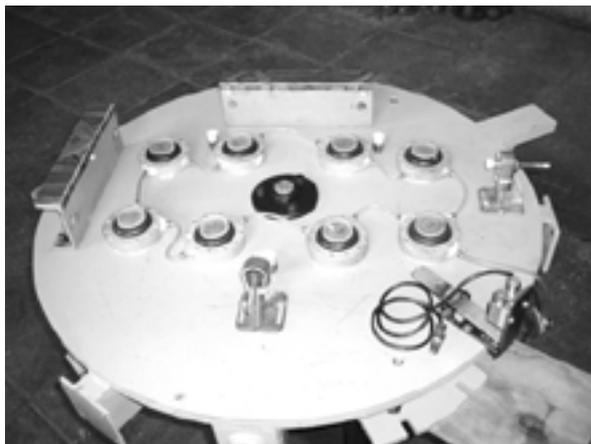


**Рисунок 3.**

**Конструкция облегченного слоистого зеркала**



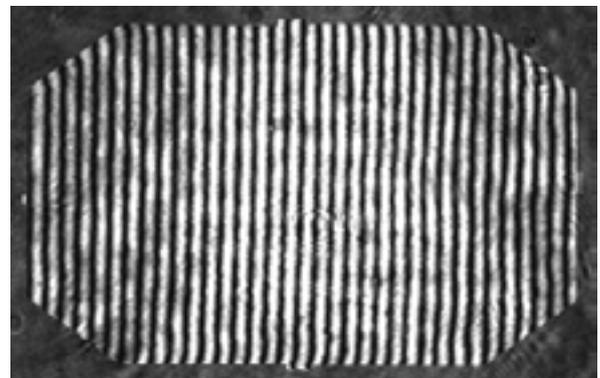
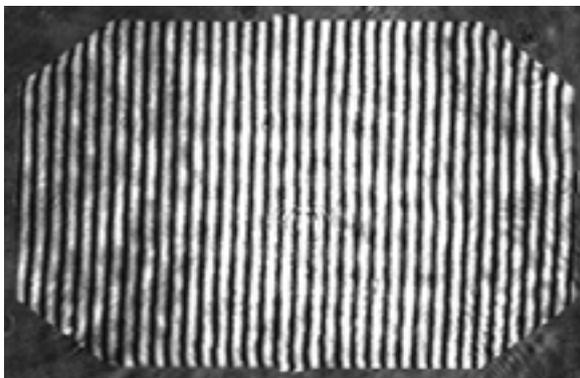
**Рисунок 4.**  
*Эскиз астрономического сферического зеркала*



**Рисунок 5.**  
*Мембранно-пневматическая оправа*



**Рисунок 6.**  
*Стенд контроля астрономического сферического зеркала*



**Рисунок 7.**  
*Финишные интерферограммы космического зеркала со сферической поверхностью*

Контроль формы поверхности выполняется интерферометром типа Тваймана-Грина в вертикальном исполнении в контрольном стенде над обрабатывающим станком (рис. 6).

Интерферограммы одного из таких зеркал приведены на рис. 7. RMS волнового фронта составляет  $0.025\lambda$ .

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗЕРКАЛА С ВЫСОКОАСФЕРИЧЕСКОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

На рис. 8 показана конструкция зеркала, в которой для облегчения выполнены полости с тыльной стороны изделия (ячейки облегчения).

Асферическая поверхность зеркала представляет собой параболоид. Уравнение в общем виде записывается как  $y^2 = 2px$ .

$r_4$  – радиус ближайшей сферы (рис. 9). ONTC – образующая асферической поверхности. NKC – образующая «четырёхточечной» сферы.  $NM = f$ .

Радиус ближайшей «четырёхточечной» сферы находим по формуле:

$$r_4 = \sqrt{q^2 + f^2}, \text{ где:}$$

$$q = 2f \frac{Y_M}{L_Z}; L_Z = Z_C - Z_N; Y_M = \frac{Y_C + Y_N}{2}$$

$$2f = \sqrt{L_Z^2 + L_Y^2}; L_Y = Y_C - Y_N; Z_M = \frac{Z_C + Z_N}{2}$$

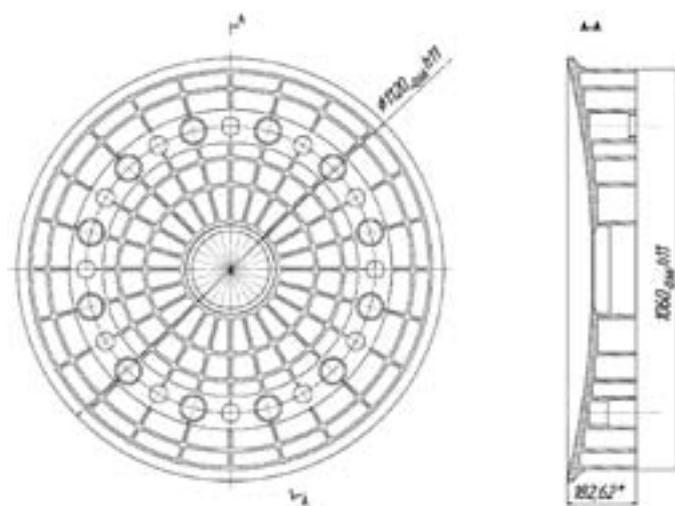


Рисунок 8.

Конструкция зеркала с ячейками облегчения

В нашем случае:

$$Z_c = 67.622 \text{ мм}, Z_N = 2.311 \text{ мм},$$

$$Y_c = 558 \text{ мм}, Y_N = 103.911 \text{ мм}.$$

Отсюда следует, что

$$L_Z = 65.311 \text{ мм} \text{ и } L_Y = 454.086 \text{ мм}.$$

Тогда  $f = 229.379 \text{ мм}$ ,  $Y_M = 330.957 \text{ мм}$ ,  $q = 2324.714 \text{ мм}$ .

Радиус ближайшей сферы  $r_4 = 2336.004 \text{ мм}$ .

Уравнение поверхности  $y^2 = -46.02 x$

$\varphi_c$  - Крутизна, измеряемая углом между касательными к образующей асферической поверхности в её вершине и в зоне светового диаметра.

$$\text{tg}(\varphi_c) = \frac{D_c}{2p} = \frac{Y_c}{p};$$

$$p = 2301 \text{ мм}, Y_c = 558 \text{ мм}; \varphi_c = \text{arctg}\left(\frac{Y_c}{p}\right) = 0.238 \text{ рад}$$

Асферичность относительно ближайшей сферы – «четырёхточечная» асферичность

( $a_4$  в мм) – отступление от сферы, проходящей через зоны внутреннего и внешнего световых диаметров. Наибольшее отступление от сферы -  $a_{\text{макс}}$ .

$$a_4 = r_4 - \sqrt{(Z_0 - Z)^2 + Y^2}, \text{ где}$$

$$Z_0 = Z_M + \sqrt{q^2 - Y_M^2} \text{ и } Y = Y_N \dots Y_C \text{ (всего 10 - 20 зон)}$$

По расчету, наибольшее отступление от сферы  $a_{\text{макс}} = 250 \text{ мм}$ .

Градиенты асферичности ( $\gamma_4$ ) – наибольшее изменение соответствующей асферичности на длине дуги образующей, равной 1 мм.

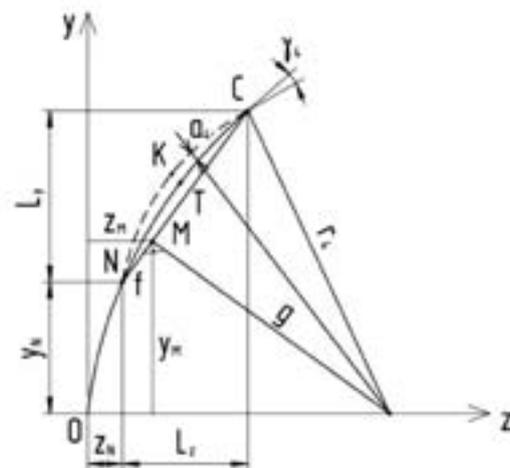


Рисунок 9.

Технологические показатели асферической поверхности с отверстием

С геометрической точки зрения градиент асферичности представляет собой угол между касательными к асферической поверхности и к соответствующей сфере в данной зоне.

$$\gamma_4 = \frac{a_{4K} - a_{4(K-1)}}{Y_{4K} - Y_{4(K-1)}} = 0.0001$$

На основании перечисленных требований разрабатывается технологический процесс изготовления зеркала, включающий изготовление заготовки, сверление центрального отверстия и изготовление структуры облегчения, изготовление сферической поверхности и затем асферизация. Асферизация выполняется шлифованием, поскольку она составляет 250 мкм. Далее зеркало полируется и выполняется финишная доводка малыми полирующими инструментами с использованием программно-управляемого процесса.

Приведенный выше технологический процесс изготовления астрономического асферического зеркала является наиболее оптимальным. Он позволяет обеспечить все заданные в конструкторской документации к зеркалу показатели.

Контроль асферического параболического зеркала проводится с помощью интерферометра ИКАП-2, построенного по схеме неравноплечего интерферометра Тваймана – Грина и вспомогательного плоского зеркала (рис. 10) [7-10].

Волновой фронт, выходящий из рабочей

ветви, интерферирует с плоским волновым фронтом, идущим из эталонной ветви. По интерференционной картине определяют ошибки контролируемой поверхности. Поскольку лучи света дважды отражаются от контролируемой асферической поверхности, то ошибки поверхности учетверяются на волновом фронте. Этапы формообразования рабочей поверхности представлены на рисунке 11.

На основании всего вышеперечисленного проектируется стенд контроля (рис. 12). Эталонное плоское зеркало устанавливается на ленте подвеса. Контролируемое зеркало устанавливается в штатную оправу с разгрузками, в которой оно будет работать в составе объектива. Естественно, такой вариант формообразования наиболее эффективен.

#### ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОСЕВОГО ОБЛЕГЧЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для высокоточной астрооптики космической системы (рис.13) требуется качественное облегченное зеркало, которое играет в установке главную роль [1-5]. Поэтому необходимо соблюсти требования, предъявляемые для работы в космосе при значительных нагрузках.

Облегчение значительно уменьшает массу зеркала (с 13 кг заготовки до 3.4 кг готового изделия, т.е. облегчение 74%), структура облегчения выбирается таким образом, чтобы

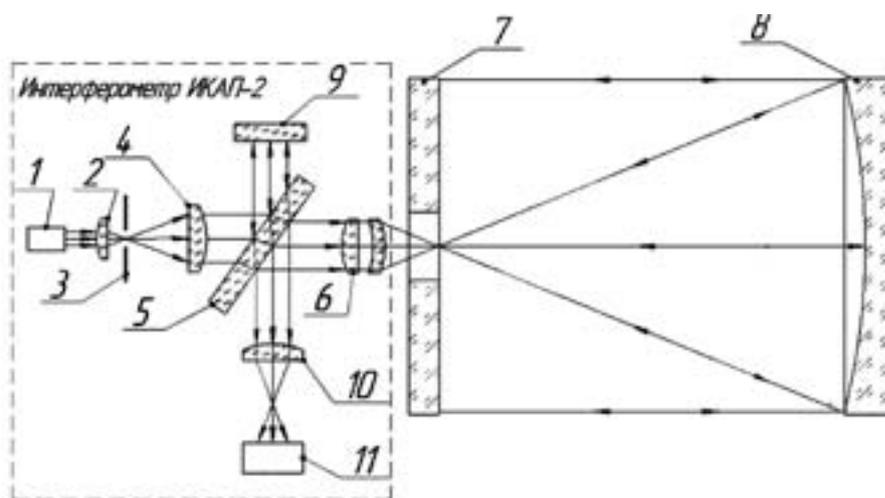
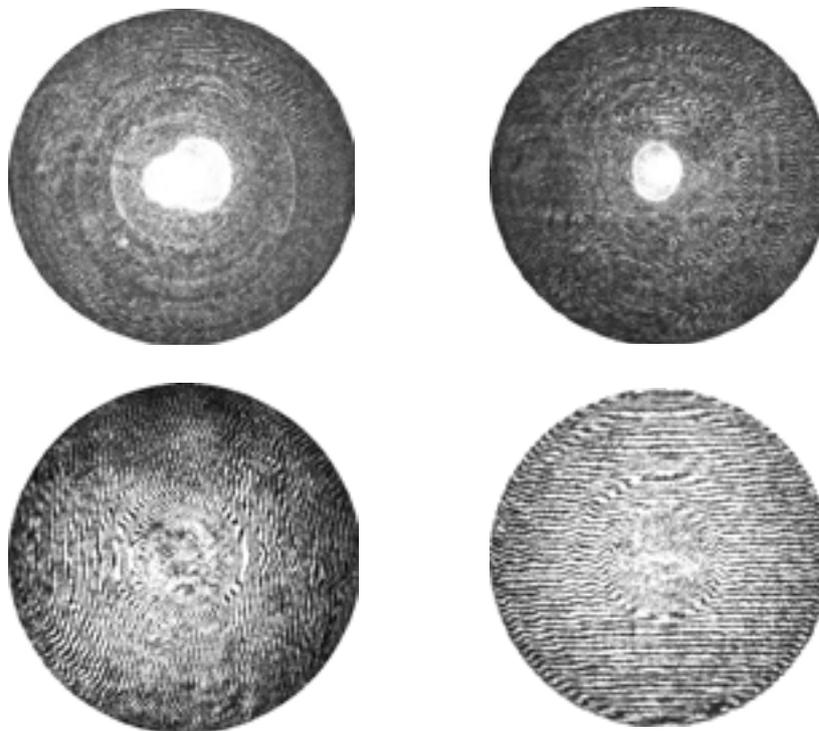


Рисунок 10.

Функциональная схема интерферометра ИКАП-2



*Рисунок 11.*

*Формообразование рабочей поверхности зеркала*

обеспечить дальнейшее крепление зеркала в оправе, обработку и контроль его в процессе формообразования, а также обеспечить необходимые прочностные характеристики зеркала в процессе эксплуатации.

Проектируемый технологический процесс изготовления зеркала должен соответствовать требуемым характеристикам и особенностям детали. На рис. 14 показано зеркало в оправе и представлена финишная интерферограмма отраженного волнового фронта. RMS волнового фронта составляет  $0.022 \lambda$ .



*Рисунок 12.*

*Внешний вид стенда контроля*

#### **МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ ПАРЫ ОБЛЕГЧЕННЫХ ЗЕРКАЛ НЕКРУГЛОЙ ФОРМЫ ИЗ ЕДИНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Целью данной работы была разработка оптимального технологического процесса изготовления астрономического вогнутого асферического зеркала для оптико-электронного комплекса космического базирования, обеспечения стереоскопической обзорной съёмки поверхности Земли из космоса с борта космического аппарата. Изготовление требуемого зеркала представляет большую техническую трудность из-за больших размеров оптической поверхности при высоких требованиях к ее форме поверхности и точности обработки. Габаритные параметры зеркала приведены на рис. 15.

Один из способов изготовления внеосевых асферических зеркал – изготовление двух деталей из единой заготовки. Преимуществом данного подхода является то, что полученные внеосевые асферические зеркала, которые в оптической системе работают в паре, имеют идентичные оптические параметры, прежде всего вершинный радиус.

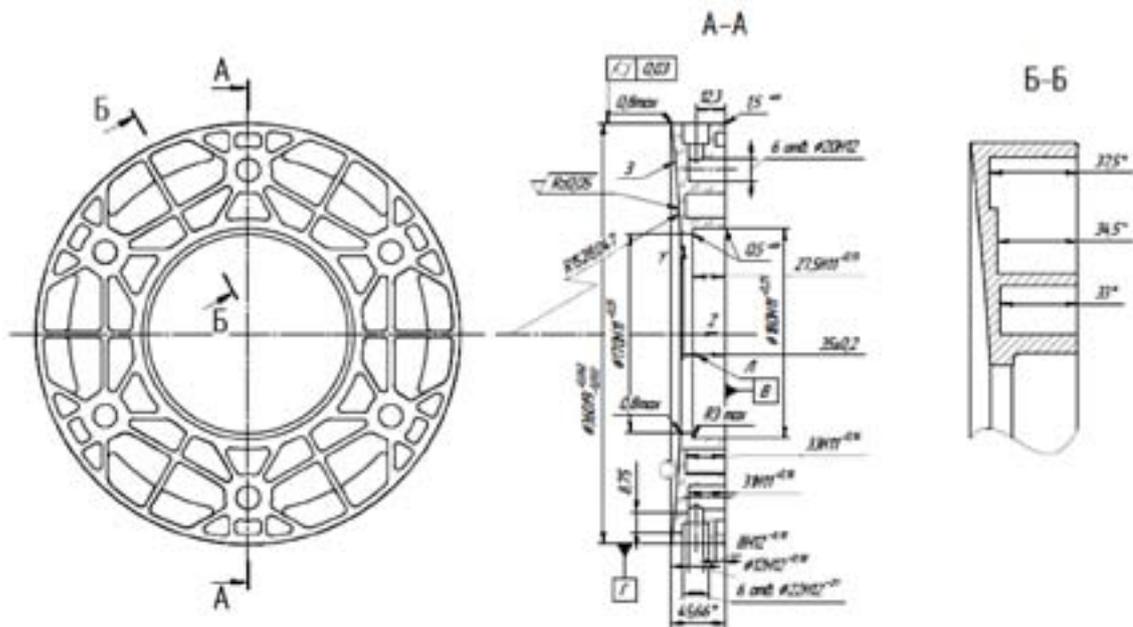


Рисунок 13.  
Эскиз зеркала

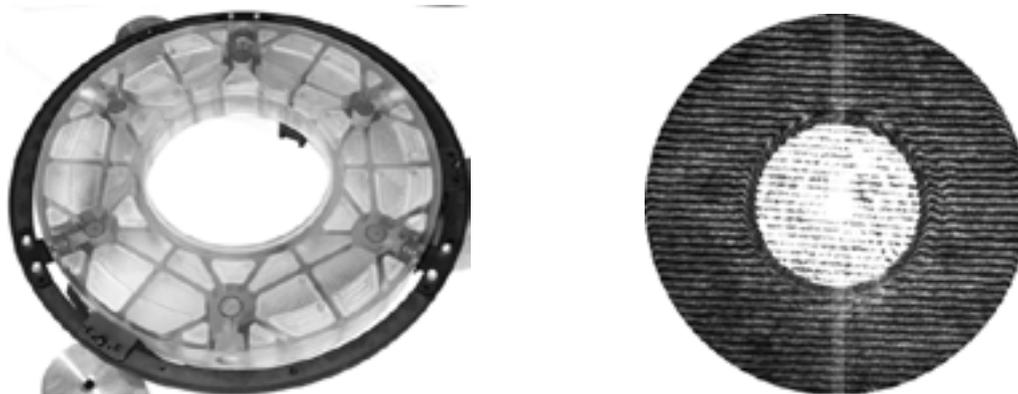


Рисунок 14.  
Зеркало в оправе и финишная интерферограмма зеркала

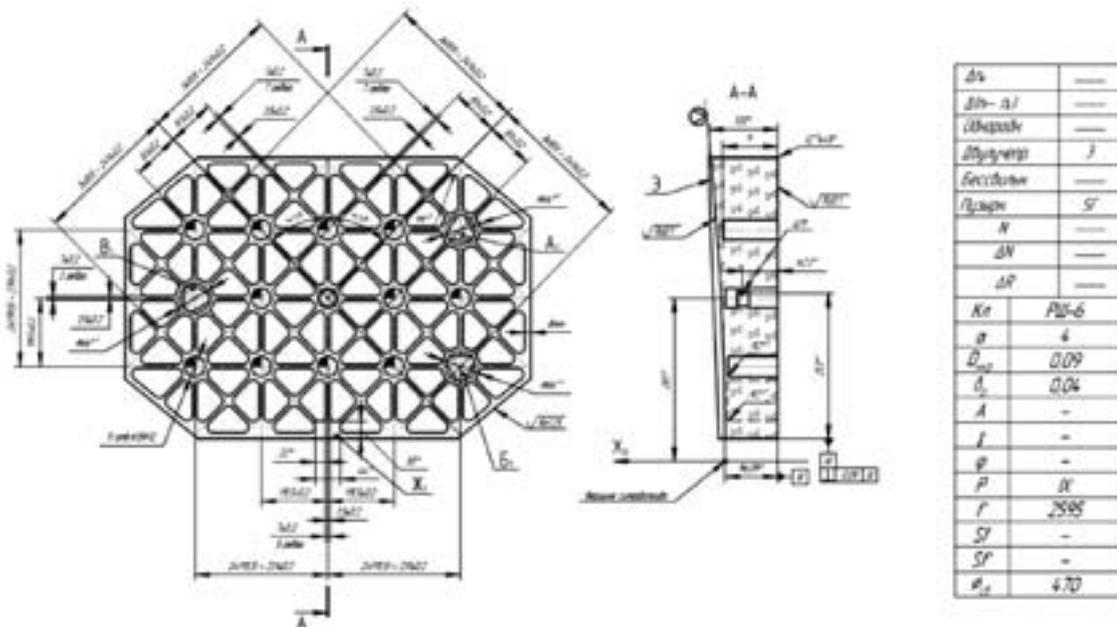
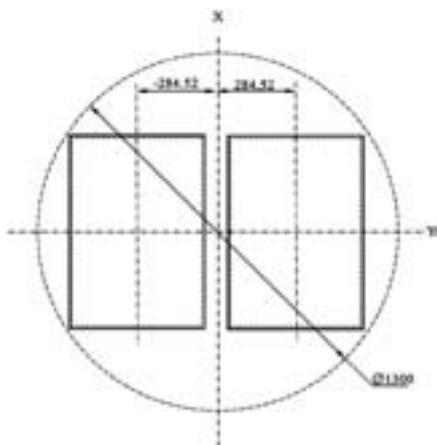


Рисунок 15.  
Главное зеркало



**Рисунок 16.**

**Расположение зеркал относительно центра заготовки**

Это позволяет проводить их юстировку и контроль совместно, что в дальнейшем обеспечивает их совместную работу в оптической системе.

На рисунке 16 продемонстрирована схема расположения будущих зеркал в заготовке.

Центральные и крепёжные отверстия и ячейки облегчения изготавливаются в заготовке сразу для обоих зеркал на координатно-расточном станке различным алмазным инструментом (фрезами, сверлами и др.). При создании структуры облегчения сначала осуществляется сверление отверстий по углам ячейки, затем высверливание по её контуру.

Далее выполняется операция фрезерования вогнутой сферической поверхности на карусельном станке алмазным инструментом. Станок работает в полуавтоматическом режиме. Рабочий-оператор устанавливает и



**Рисунок 17.**

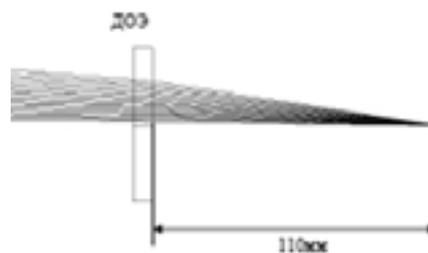
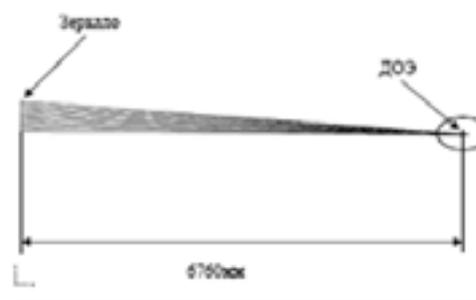
**Схема дифракционного корректора для контроля внеосевого сегмента**

механически крепит заготовку на планшайбе станка и снимает ее по окончании обработки. В автоматическом режиме происходит подвод шпинделя с инструментом к детали, рабочие перемещения до заданного размера обработки.

Асферизация поверхности осуществляется малоразмерным инструментом на шлифовально-полировальном станке.

Контроль поверхности зеркал осуществляется с помощью интерферометра, построенного по схеме Тваймана-Грина. Как было упомянуто выше, необходимо проводить контроль в паре, поскольку в оптической системе прибора разнорядность обоих компонентов должна быть менее 0,2мм. Ещё одной особенностью метода контроля является использование голографического корректора волнового фронта, или дифракционного оптического элемента, который преобразует сферический фронт в асферический [11-13].

Для правильной юстировки детали относительно оптической оси системы контроля на ДОЭ расположены специальные оптические элементы[4]. Схема ДОЭ и расположение его в оптической системе представлены на рисунках 17 и 18.



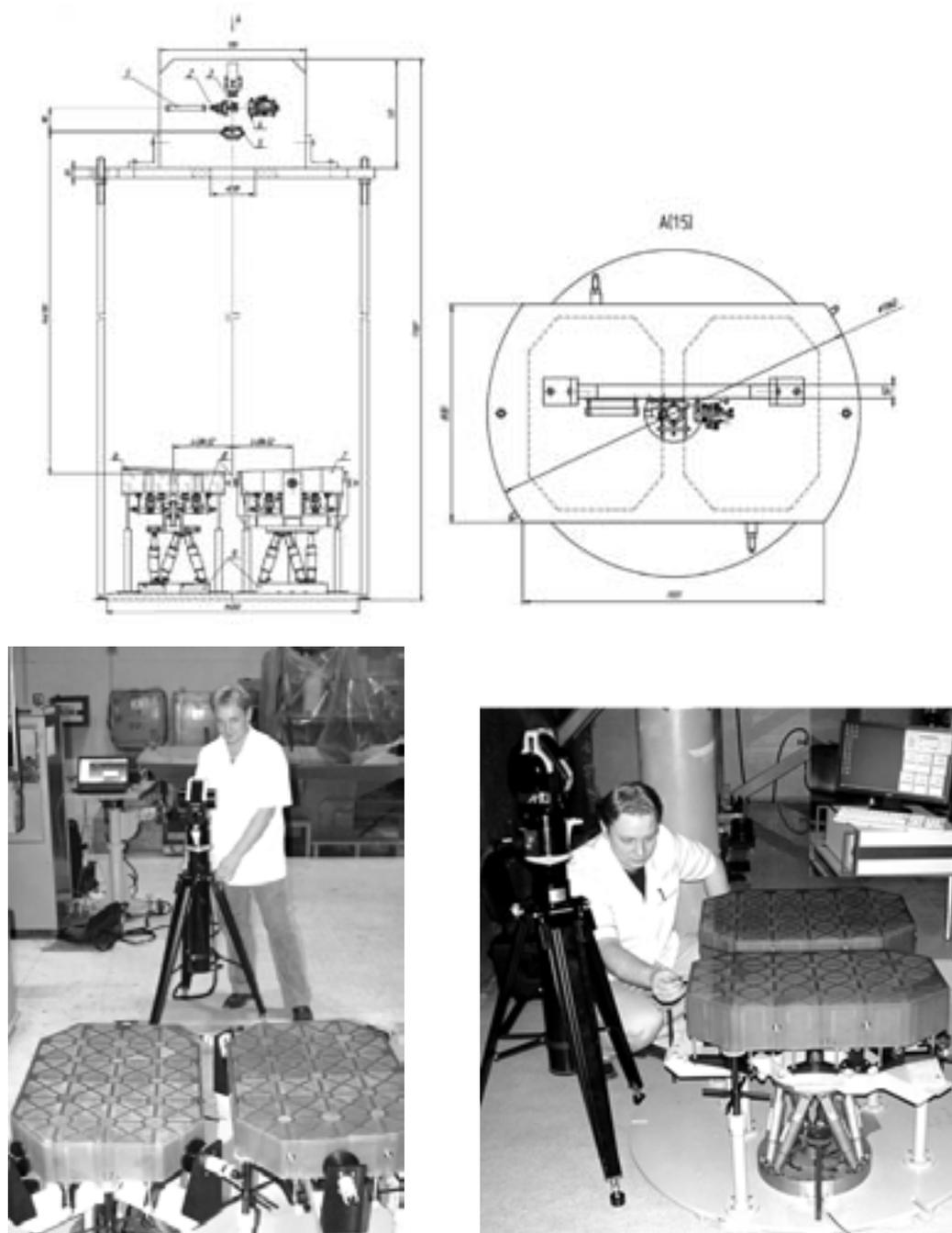
**Рисунок 18.**

**Схема расположения ДОЭ-корректора для контроля внеосевого сегмента**

Конструкция контрольно-измерительного стенда изображена на рис. 19.

Зеркала устанавливаются на оправу Гребба, необходимую для создания условий, минимизирующих остаточную деформацию зеркала, и имитирующую будущую работу зеркал в невесомости. Система стабилизации положения зеркала обеспечивает сохранение его пространственного положения относительно оправы [1,2]. Оправы с зеркалами устанавливаются на шестиосевые гексапо-

ды, которые обеспечивают движение оправы с зеркалом по всем 6-ти степеням свободы. Положение контролируемого зеркала надёжно закрепляется, второе зеркало юстируется относительно первого с использованием гексапода. Телескопическая система и микрообъектив располагаются на стойке и могут двигаться относительно неё вдоль оптической оси. Узел светоделительного кубика жёстко закреплён на плате, подвижек не имеет. Все остальные узлы выставляются отно-



*Рисунок 19.*

*Стенд для контроля асферической поверхности*

сительно кубика. Продольная подвижка узла эталонного сферического зеркала предназначена для совмещения автоколлимационной точки вдоль оптической оси. Узел голографического корректора имеет подвижки.

Действующий вариант корректора волнового фронта со вспомогательными юстировочными элементами представлен на рис. 20.

На рис. 21 представлены финишные интерферограммы волнового фронта двух внеосевых элементов.

#### МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВНЕОСЕВОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА КРУГЛОЙ ФОРМЫ

Следующий пример изготовления крупногабаритного внеосевого зеркала – асферизация, доводка и контроль зеркала с уже готовым внешним круглым периметром, когда оптическая ось поверхности зеркала находится вне детали. Классические приёмы финишной обработки поверхности зеркала здесь неприменимы, потому что на зеркале внеосевая асимметрия, и только в начальной стадии ближайшая сфера может быть изготовлена классическим способом. При установке такой детали (рис. 22) на станок для шлифования сферы изготавливается специальный клин, чтобы обрабатываемая поверхность находилась в горизонтальном положении.

Для изготовления клина разрабатывается свой технологический процесс, в ходе которого обеспечиваются важнейшие параметры



Рисунок 20.

Структура дифракционного оптического элемента для контроля пары зеркал

– угол наклона клина, максимальная и минимальная толщины по краям.

Заготовка самого зеркала отдельно проходит набор операций перед соединением с клином, включающий в себя: шлифование поверхностей, кругление заготовки и сверление отверстий структуры облегчения.

Следующий этап процесса изготовления требуемого зеркала – создание клина на заготовке и установка заготовки на клин. Далее идут этап фрезерования ближайшей сферы на рабочей поверхности, асферизация рабочей поверхности, выдерживая отклонение профиля поверхности от расчётного не более 0.001мм.

Методика съёма материала при асферизации отличается тем, что в этом случае, поскольку деталь асимметрична, формообразование выполняется малым инструментом на станке АПД-600 с программным управлением.

Контроль поверхности выполняется с внеосевым корректором волнового фронта, дифракционным оптическим элементом [11-13].

Положение голограммы-корректора относительно контролируемого зеркала показано на рисунке 23. Дифракционная структура обращена к контролируемому зеркалу.

Для точной установки основной голограммы (рис. 24) относительно интерферометра

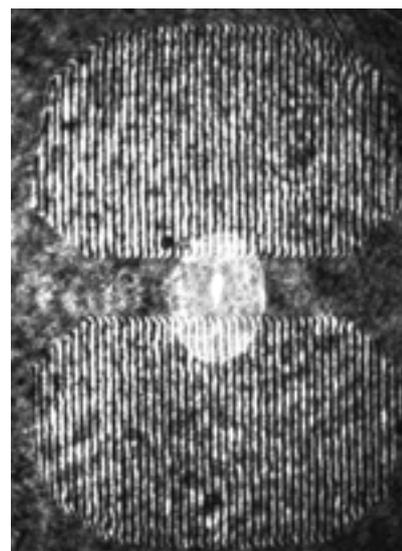


Рисунок 21.

Аттестационные интерферограммы внеосевых зеркал

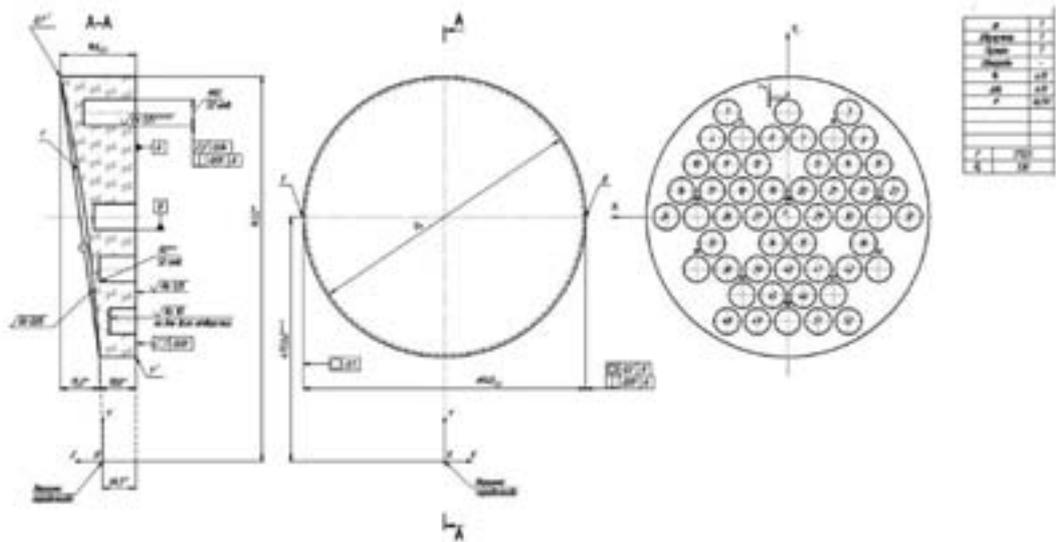


Рисунок 22.

Эскиз внеосевого параболического зеркала

используется юстировочная голограмма, которая состоит из двух частей: в центре и на краю, в виде кольца [1,2]. Эта вспомогательная голограмма рассчитана таким образом, что отражает свет точно в интерферометр, когда она установлена в требуемую позицию.

На основании рассмотренной выше функциональной схемы предложена конструкция стенда контроля заданной оптической детали (рис. 25) и конструкция узла интерферометра.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый из описанных методов обеспечивает оптимальный технологический процесс изготовления внеосевого асферического зеркала, а также подходящую конструкцию контрольно-измерительного стенда на основе

неравноплечего интерферометра Тваймана-Грина. Использование данных подходов позволяет изготовить асферическую внеосевую деталь с высокой точностью.

### Список литературы:

1. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Rumyantsev V.V. Non-traditional technologies to fabricate light weighted astronomical mirrors with high stability of surfaceshape // SPIE. 1999. Vol. 3786. P. 468-473

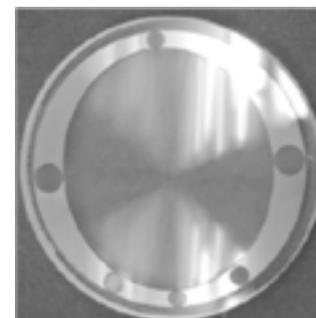
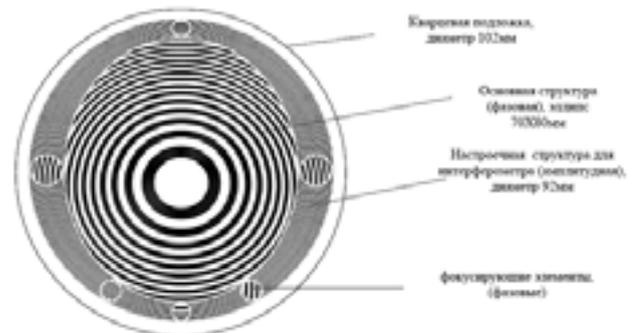


Рисунок 24.

Используемый голографический компенсатор

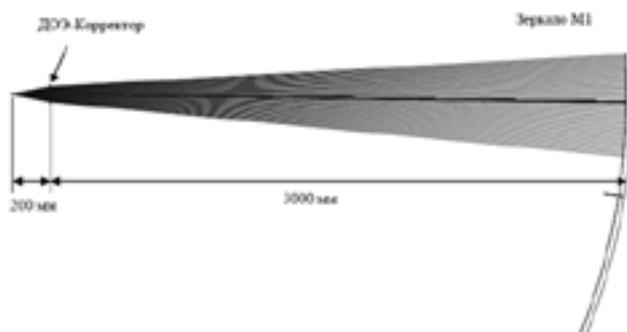


Рисунок 23.

Схема положения корректора

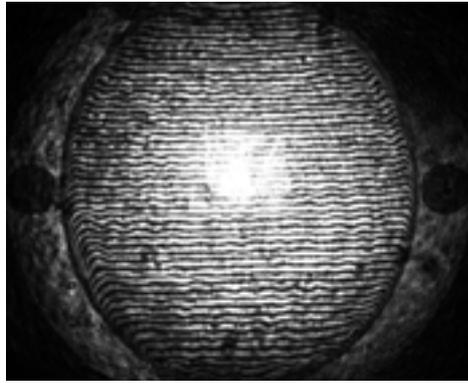


Рисунок 25.

*Полученная интерферограмма и стенд контроля*

2. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A.* Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // SPIE. 2001. Vol. 4451. P. 131-137

3. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Rumyantsev V.V.* Non-traditional technologies to fabricate lightweighted astronomical mirrors with high stability of surface shape // SPIE. 1999. Vol. 3786. P. 468-473

4. *Абдулкадыров М.А., Добриков Н.С., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.* Технология изготовления высокоточных крупногабаритных облегченных асферических зеркал с высокой стабильностью формы поверхности, Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 12. С. 6-15

5. *Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.* Изготовление оптических элементов составных зеркал для больших астрономических телескопов, Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 4. С. 18-23

6. *Самуйлов А.В., Румянцев В.В., Молев В.И., Аннушкин С.И.* Физико-химические свойства оптического ситалла СО-115М//Контенант. 2002. №4. С.24-31

7. *Денисов Д.Г.* Разработка методов и аппаратуры лазерного интерференционного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных зеркал на стадиях шлифования. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук/ Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана, Москва, 2010

8. *Денисов Д.Г., Карасик В.Е.* Анализ влияния

спекл – структуры на качество изображения интерференционной картины при контроле крупногабаритных оптических поверхностей на стадиях шлифования. Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 36-47

9. *Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Сахаров А.А.* Система контроля формы оптических деталей с использованием датчиков волнового фронта. В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине XXV Международная конференция, сборник научных трудов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, Международная академия связи, Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина, НИЯУ «МИФИ», Преображенский научный центр РАН. 2014. С. 64-69

10. *Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Кудряшов А.В., Никитин А.Н., Сахаров А.А.* Оптико-электронная система на основе датчика волнового фронта для диагностики параметров формы оптических изделий. В сборнике: Лазеры в науке, технике, медицине сборник научных трудов XXVI Международной конференции. 2015. С. 86-90.

11. *Poleshchuk A.G.* Fabrication and application of diffractive optical elements// Proc. SPIE. 2010. V. 7544. P. 75443L-1 - 75443L-12.

12. *Poleshchuk, A.G.* Computer generated holograms for aspheric optics testing// Proc. SPIE. 2009. V. 7133. P. 713333-1- 713333-9.

13. *Полещук А.Г., Маточкин А.Е.* Лазерные методы контроля асферической оптики. – Фотоника, 2011, №2, с.38–43.

## К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ

ПОДОБРЯНСКИЙ А.В., ГЛУХОВ Ю.А., МАЙДАШЕВА Д.А.

АО «НПО «Оптика», г. Москва

E-mail: d.maydasheva@shvabe.com

*В статье рассмотрены различные методы изготовления оптических линз со сферическими поверхностями.*

**Ключевые слова:** оптические линзы, сферическая оптика, станки с CNC.

Современные масштабы оптического производства по сравнению с производством советского времени не сопоставимы. Если раньше оптический цех (ЛЗОС) на более 1000 станков, производил 25 - 30 млн. линз в год и считался гигантом, сейчас CDGM - «Chengdu Guangming Optoelectronic Information Material Co., Ltd.» <http://www.cdgmgd.com> - крупнейший в мире производитель оптического стекла - до 10 тыс. тонн в год, имеет мощности по выпуску до 6 млрд. заготовок (Preform, gobs, ball) для чистового прессования оптических линз. Такие заготовки должны иметь качество и шероховатость поверхности не хуже, чем у готовых линз и жесткий допуск по весу. Свой вклад в производство таких заготовок вносят и другие производители оптического стекла (Hoya, Ohara, Sumita, Schott). Кроме чистового прессования, есть и другие способы изготовления оптических линз. Массово производится полимерная оптика. В целом, можно считать, что мировое производство составляет более 10 млрд. линз в год.

При этом массовое производство охватывает линзы самого разного класса: от пластмас-

совых линз дешевых фотоаппаратов телефонов до дорогих объективов зеркальных фотоаппаратов. Последних производится более 100 млн. в год. Поскольку в каждом таком объективе от 6 до 20 линз, в среднем 12 – для их изготовления требуется 1-1,5 млрд. высокоточных линз, из которых 100-150 млн. – асферика. Себестоимость обработки асферики на станках методом последовательного шлифования и полирования достаточно высока. Поэтому производители освоили технологии и перешли на методы репликации - чистовое прессование и изготовление гибридных линз.

По заявлению ведущих специалистов фирма Nikon больше не использует метод прецизионного шлифования для того, чтобы делать асферические линзы для имиджевой оптики (фото, видео, бинокли), полностью перейдя на гибридные и прессованные линзы.

Нельзя сбрасывать со счета и традиционные, классические технологии. Поскольку большая часть сферической оптики производится в Китае, имеющем огромные ресурсы дешевой рабочей силы, проигрыш классической технологии в трудоемкости окупается

низкими затратами на оборудование и себестоимость изготовления сферических линз значительно меньше, чем при обработке на станках с CNC и приближается к себестоимости линз чистового прессования.

Специализированные станки CNC, [1] предназначенные, в том числе и для обработки асферики диаметром до 200 - 250 мм, представлены на рынке фирмами OptoTech, Satisloh, Schneider.

По распространенности и объемам выпуска - в основном это гамма станков для обработки асферики разных размеров. В дополнение к станкам необходимы приборы для щупового контроля формы поверхности (Taylor Hobson - Talysurf PGI 1240) и интерферометр (OptoTech/Zygo - OWI 150Asph). Суммарная стоимость комплекта оборудования одной технологической цепочки ~ 800 тыс. евро (500 тыс. – станки, 300 тыс. - приборы).

Основной производитель станков - фирма OptoTech (Германия) В программе фирмы станки для прецизионной и очковой оптики, приборы, оснастка, инструмент. Средняя стоимость станка 250-350 тыс. евро.

Другой изготовитель станков для обработки точной оптики - фирма Satisloh, (Германия). Фирма изготавливает станки для очковой, прецизионной и точной оптики, как дистрибьютор, поставляет все вспомогательные материалы и инструмент для обработки оптики. В каталоге фирмы прецизионные станки для фрезерования, полирования и центрирования сферических и асферических линз и плоскостей. Годовой выпуск станков для прецизионной оптики оценочно составляет 120 - 150 шт. в год.

С большим разнообразием моделей при очень малой серии связана высокая цена на станки. Станки для сферифрезерования, обработки плоскостей имеют примерно такую же группу сложности и точностные параметры, что и, например, вертикальные металлообрабатывающие центры фирмы HAAS на тот же диапазон размеров. Только стан-

ки HAAS стоят в базовой комплектации 40 тыс. €, а станки OptoTech ~350 тыс. €. Станки HAAS изготавливаются серийно до нескольких тысяч в год. Фирма же OptoTech вынуждена перекладывать затраты на разработку и подготовку производства на малые серии, что и определяет их высокую цену.

Тем не менее, станки указанного назначения, судя по сайтам фирм - обработчиков, закрывают технологическую нишу для изготовления, например, асферических деталей:

- механически полированные асферические поверхности гарантируют работу при больших мощностях светового потока (силовые лазеры);
- такая обработка необходима, когда после обычного полирования происходит доводочная обработка для получения шероховатости поверхности менее 1 - 3 nm или точности выше  $\lambda/4 : \lambda/20$ ;
- нет ограничений по размеру деталей: если прессованная деталь размером более 60 мм считается крупногабаритной, то станки для обработки асферики позволяют обработать детали в 500 и более мм;
- при обработке на станках с ЧПУ себестоимость в меньшей степени зависит от количества деталей в партии, так как при прессовании стоимость пресс-формы, а она может составлять 500 -1000 евро, закладывается в себестоимость заказа;
- оптимальное формирование светового пучка и фокусирующих свойств;
- материалы с низкой дисперсией снижают хроматические погрешности изображения, и, если они не могут быть изготовлены прессованием, делаются механической обработкой;
- асферика с прецизионной полировкой обеспечивает лучшую однородность в фокусе;
- для асферик размером более 15 мм коррекция волнового фронта в 20 - 50 раз лучше, чем у прессовок;

Станки с ЧПУ довольно сложные изделия и требуют квалифицированного сервисного обслуживания [2]. При изготовлении стан-

ков одной модели несколько штук в год, продаваемых по всему миру, фирменное сервисное обслуживание вряд ли осуществимо. Поэтому предприятие-покупатель должно будет готовить кадры у себя, возможно с обучением у производителя. Содержать такие кадры на обслуживании 1 - 2 станков не целесообразно: нужна централизованная закупка минимум 10 таких станков и организация на этой базе отраслевого участка изготовления соответствующих деталей. По опыту иностранных фирм пара таких станков (шлифовальный и полировальный) может изготовить при 2-х сменной работе в зависимости от габарита и степени сложности от 8000 до 2000 деталей в год. При средней стоимости станка 300 тыс. евро и сроке окупаемости 10 лет амортизационные отчисления составят от 8 до 30 евро на деталь. Поэтому задача заключается в том, чтобы найти заказы на достаточное количество деталей соответствующего ценового диапазона.

Следует отметить, что при существующих объемах производства станков для изготовления асферики (всеми изготовителями - несколько десятков штук в год) в эксплуатации может находиться несколько сот станков. При указанной выше производительности они могут обработать несколько миллионов деталей. Выпуск же асферических деталей составляет около миллиарда, а всего линзовой оптики - несколько миллиардов штук в год. Поэтому надо четко представлять нишу таких станков, во всяком случае, это не дешевая массовая оптика.

Так, например, фирма «Асферикон» (Германия) обрабатывает стандартную (по каталогу) асферическую линзу в диапазоне диаметров 6-100 мм по цене соответственно от 100 до 730 евро за шт. Детали «на заказ», большего размера, с особыми требованиями стоят гораздо больше. Для набора объемов выпускается большая номенклатура деталей: асферика, аксиконы, цилиндры самых разных размеров - от 1 до 200 мм. Всего фирма выпускает

более 500 видов. Объем продаж - около 20 млн. евро в год. Чтобы набрать такой объем заказов, фирма имеет постоянных заказчиков от Канады до Китая, является постоянным участником международных выставок и конференций.

Среди других крупнейших фирм, серийно производящих прецизионную оптику, известны Yenoptic (Германия), MikroPAG (Швейцария).

В статье рассмотрены экономический анализ использования станков с CNC при обработке линз, выполненный на примере обработки линзы:

- заготовка - плоская таблетка  $\varnothing 104$  мм,  $t = 18$  мм
- линза -  $\varnothing 100$  мм,  $R_1 = 205,0$  мм,  $R_2 = 306,0$  мм,  $h_1 = 6,6$  мм,  $h_2 = 4,4$  мм,  $t_u = 15$  мм,  $N = 3$ ,  $\Delta N = 0,3$

Данные для расчетов времени загрузки станков для партии в 100 деталей приведены в табл. 1.

При расчете зарплаты принята часовая ставка 3 С для наладчиков и 2 С для рабочих-станочников, при полировании рабочий обслуживает 4 шпинделя.

Затраты на амортизацию:

$$\Lambda = \frac{C \cdot 0,12 \cdot T}{3850 \cdot K_{исп}}$$

Результаты расчетов приведены в табл. 2

Из таблицы видно, что себестоимость изготовления сферической линзы по классической технологии меньше, чем на станках CNC в 1,5 раза.

В связи с планируемым увеличением объемов выпуска товаров народного потребления, в том числе простых оптико-механических изделий, этот вопрос необходимо учитывать.

Из технологий, получивших распространение в последнее время, самая массовая и эффективная - чистовое прессование оптических деталей из стекла. Технология PAG (Plastics on Aspherical Glass) широко исполь-

**Таблица 1.**  
**Данные для расчетов времени загрузки станков**

Операция	Переход	Припуск, мм	Инструменты		Подача, мм/мин	Машин. время, мин.	Время цикла, мин.
			Вид	Алмаз			
Традиционная технология							
Сферофрезерование R <sub>1</sub> =205,0 мм,	1-ый	7,5	2A2 Ø70мм	AC65 200/160	2,5	4,0	5,0
	2-ой	0,5		AC65 80/63	0,5		
Сферофрезерование R <sub>2</sub> =306,0 мм,	1-ый	5,5	2A2 Ø 70мм	AC65 200/160	2,5	3,2	4,0
	2-ой	0,5		AC65 80/63	0,5		
Тонкое шлифование R <sub>1</sub> =205,0 мм	1-ый	0,15	Чашка	АСМ 28/20		3,0	5,0
	2-ой	0,05		АСМ 14/10		1,5	
Тонкое шлифование R <sub>2</sub> =306,0 мм	1-ый	0,15	Чашка Ø120мм	АСМ 28/20		3,0	5,0
	2-ой	0,05		АСМ 14/10		1,5	
Полирование		0,015	Чашка Ø120мм	-		60,0	65,0
Полирование R <sub>2</sub> =306,0 мм		0,015	Чашка Ø120мм	-		60,0	65,0
Центрирование		2,0	1A1 Ø200мм	АСМ 40/28	0,4	5,0	6,0
Обработка с использованием станков с CNC							
Сферофрезерование R <sub>1</sub> =205,0 мм, R <sub>2</sub> =306,0 мм припуск 8 мм	1-ый	1,1	2A2 Ø70мм	AC65 100/80			12,0
	2-ой	0,3		АСМ 28/20			
Полирование R <sub>1</sub> =205,0 мм		0,015	Чашка Ø120мм	-			24,0
Полирование R <sub>2</sub> =306,0 мм		0,015	Чашка Ø120мм	-			
Центрирование			Круг 1A1 Ø120мм	АСМ 40/28			5,0

зуется ведущими производителями оптики как для массовой продукции, так и для объективов профессионального класса. Дешевизна таких линз по сравнению с линзами, получаемыми по классической технологии, позволила использовать их, иногда и по несколько штук в объективе, и за счет этого повысить качество при значительном уменьшении габарита и числа оптических компонентов.

Стоимость прессованных оптических деталей приведена в табл. 3.

Цены на механические обработанные (шлифованные и полированные) асферические

линзы на станках CNC фирмы «Асферикон» представлены в табл. 4.

Механическое шлифование и полирование - часто длительный процесс даже при современном компьютерном числовом программном управлении с детерминированными шлифовальными и полировальными станками. Время цикла шлифования и полирования доходит до 2-3 часов на поверхность.

Кроме того, стоимость станков с CNC для шлифования и полирования 300 -500 тыс. евро, что при таких временах цикла требует амортизационных отчислений до 100 евро на

**Таблица 2.**  
**Результаты расчетов**

Операция	Оборудование				Зарплата, €		Себестоимость	
	Модель	Стоим., тыс.€	T <sub>наладки</sub> + T <sub>обработ.</sub> час.	Коэф. загрузки	Наладчика	Рабочего	Зарплата	Амортизация оборудования
<b>Традиционная технология</b>								
Грубое шлифование, 2 стороны по 2 перехода	АПС-100К	35,0	8 + 15 = 23	0,25	24,0	30,0	54,0	80,5
Нанесение фасок	Ручная, D150	-	8,0	-	-	16,0	16,0	-
Тонкое шлифование, 2 стороны по 2 перехода	6ШП-200	16,0	8 + 17 = 25	0,25	24,0	34,0	58,0	65,0
Полирование 2-х сторон	6ШП-200	16,0	2 + 217 = 219	0,25	6,0	109,0	115,0	
Центрирование	ЦСП-100 А	27,0	2 + 10 = 12	0,25	6,0	20,0	26,0	32,5
							269,0	178,0
						<b>Итого:</b>	<b>447,0</b>	
<b>Обработка на станках с CNC</b>								
Грубая и тонкая обработка сферы 2 перехода с 2-х сторон	SM 50 CNC-D-3C	285000	20,0	0,8	15,0	40,0	55,0	222,0
Полирование 2-х сторон	SPK 50 CNC D	240000	40,0	0,8	15,0	40,0	55,0	374,0
Центрирование	ZM 25 CNC-D	175000	5,0	0,8	6,0	10,0	16,0	34,0
						<b>Итого:</b>	126,0	630,0
							<b>756,0</b>	

**Таблица 3.**  
**Стоимость пресованных оптических деталей**

Объем партии	Полимерная оптика	Стеклопаяная оптика
Малый 1-1000 шт.	Стоимость оснащения 7,5 тыс. \$ Расходы на подготовку производства 1 тыс. \$	Средняя по каталогам оптики компаний Melles Griot, Newport, Edmund Scientific \$10 - \$100 за шт.
Средний 1000- 10000 шт.	Стоимость оснащения 10-15 тыс. \$ Расходы на подготовку производства 2 тыс. \$ Стоимость за шт. \$ 1 – 10	Поставщики комплектующих стеклянных линз цена за шт. \$3 - \$10
Большой > 10000 шт.	Стоимость оснащения 25 - 50 тыс. \$ Расходы на подготовку производства 2 тыс. \$ Стоимость за шт. \$ 0,25 - 3	Поставщики комплектующих стеклянных линз цена за шт. \$ 0,5 - \$ 5

**Таблица 4.**  
**Цены на механические обработанные асферические линзы на станках CNC фирмы «Асферикон»**

Шифр продукта <sup>1</sup>	Диаметр	Фокусное расстояние	Числовая апертура	Рабочий отрезок	Цена <sup>2</sup>
	мм	мм		мм	С
06-04HPX-U	6	4.6	0.537	2.89	99
10-08HPX-U	10	8	0.547	6.00	119
12-10HPX-U	12.5	10	0.545	7.61	139
15-12HPX-U	15	12	0.546	8.96	149
18-15HPX-U	18	15	0.534	11.41	159
20-18HPX-U	20	18	0.488	13.84	169
25-20HPX-U	25	20	0.543	15.70	179
30-26HPX-U	30	26	0.522	20.54	229
45-32HPX-U	45	32	0.612	24.12	299
50-40HPX-U	50	40	0.554	31.42	319
75-60LPX-U	75	60	0.619	36.60	510
100-100LPX-U	100	100	0.478	76.27	730

<sup>1</sup>U – относится к линзам без покрытий

<sup>2</sup>цены относятся к линзам без покрытий

**Таблица 5.**  
**Размеры прессуемых заготовок**

Средний размер по каталогу	Диаметр линзы, мм	Время цикла	Доступность заготовки
Малый	<4,0	Кратчайшее	Высокая
Средний	4,0 < 15,0	Среднее	Высокая
Большой	15,0 < 30,0	Длительное	Средняя - низкая
Сверх большой	30,0 > 60,0	Очень длительное	Низкая

**Таблица 6.**  
**Требования к пресс-форме**

Шероховатость поверхности	5 - 20 A RMS
Точность поверхности	1/1 OX

**Таблица 7.**  
**Величины допусков при изготовлении механической обработкой и прессованием**

Показатели	Ед. измер.	Механическая обработка			Прессованная		
		Коммерческая	Точная	Высокой точности	Стандарт	Стандартное качество	Прецизионное качество
Погрешность формы асферики	мкм	±5	± 1	±0,25	±0,5		
Радиус (асферики)	%	± 1	±0,05	±0,01	±0,05		
Радиус (сферы)	%	±0,5	±0,1	± 0,025	±0,1		
Точность (сферы)	колец	8	2	0,1	5	5	3
Местная ошибка (сферы)	кольц	2	0,5	0,02	2	2	0,5
Центричность (отклонение пучка)	угл. мин	3-5.	1-3	0,25 - 1	1 - 3	5	2,5
Допуск на толщину по центру	мм	±0,15	±0,05	±0,01	±0,02	± 0,025	±0,012
Допуск на диаметр	мм	-0,05	- 0,025	-0,01	- 0,025		
Качество поверхности		80/50	60/40	20/10	60/40	60/40	20/10
Фаски	мм	1	0,1	0,02	0,1		
Типичный объем партии	Шт.	1 - 1000	1 -500	1-50	500+		

поверхность. Стандартное время, затраченное на выполнение операции для асферических прессуемых линз, находится в пределах 8-15 минут на линзу в целом. При прессовании линз малого размера возможно использование многоместных форм. Сами прессы более просты и на порядок дешевле по сравнению со станками. Прессы могут комплектоваться устройствами автоматической установки заготовок и съема готовых деталей. Поэтому существуют производства, прессующие десятки миллионов линз в месяц.

В табл. 5 приведены размеры прессуемых заготовок.

Трудность представляет изготовление прессформ для прессования. Требования к пресс-форме представлены в табл. 6. Для их изготовления из твердого сплава или специальных сталей используются станки для алмазного точения. В последнее время появились пресс-формы из керамики, для обработки которых используют специальные методы доводки.

В табл. 7 представлены величины допусков при изготовлении механической обработкой и прессованием.

Ограничение на использование чистового



Рисунок 1.

Пример технологического процесса прессования двояковыпуклой линзы

прессования накладывает то, что не все стекла прессуются. Однако, производители стекол разрабатывают все больше новых марок стекол, пригодных для прессования. Кроме стекол прессуются изделия из кварца. Если прессы для стекла имеют рабочую температуру до 800°C, прессы для кварца - 1500°C.

На рис. 1 приведен пример технологического процесса прессования двояковыпуклой линзы.

Список литературы:

1. Подобранный А.В., Глухов Ю.А. Ана-

лиз рынка алмазного инструмента для обработки неметаллических материалов с целью определения на нем ниши алмазного производства ГУП «НПО «Оптика» и централизованного обеспечения предприятий отрасли покупным инструментом // Контентант.-2013.-том 12.- №2.- с.14-28.

2. Подобранный А.В., Глухов Ю.А. Современное оборудование и технологии для механической обработки оптических деталей // Контентант.-2014.-том 13.-№2.-с.43-58.

# К ВОПРОСУ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СТАНКОСТРОЕНИЯ

ПОДОБРЯНСКИЙ А.В., МАЙДАШЕВА Д.А., ГРИГОРЬЕВА А.А.

АО «НПО «Оптика», г. Москва

E-mail: optica@nprooptica.ru, d.maydasheva@shvabe.com, stown98@yandex.ru

*Кратко рассмотрены итоги анализа технического уровня оптического производства предприятий Холдинга АО «Швабе». Результаты выполнения двух программ союзного государства России и Республики Беларусь в 1998-2008 гг. и сложившаяся сегодня ситуация с отечественным оптическим станкостроением.*

**Ключевые слова:** оптические детали, шлифование, полирование, сферическая оптика, станки с CNC, станки «свободного притира».

Планируемый рост объемов производства товаров народного потребления (ТНП) органично затрагивает вопрос изготовления оптических деталей, неотъемлемо входящих в состав оптико-механических или оптико-электронных изделий ТНП самого различного назначения: медицинские, геодезические, измерительные, бытовые, сельскохозяйственного назначения и пр.

Крупносерийное производство ТНП естественно требует по меньшей мере серийного производства оптических деталей самой различной формы (линзы, призмы, пластины, сетки, шкалы и пр.) и размеров (от микрооптики, диаметром от 2 мм до 12:15 мм, до оптики диаметром 100-150 мм).

Существовавшие ранее заводы:

- «Юпитер» в г. Валдае, Новгородской обл. – производил до 1 млн. шт./год объективов «Гелиос-44», «Гелиос-44-2», «Гелиос-44М4» и т.д., т. е. более 6 млн. шт./год линз.

- «СОМЗ» - Салаватский оптико-механический завод, производивший порядка 1 млн. шт./год призмных биноклей мод «Беркут» и соответственно 4 млн. шт./год прямоугольных призм, и 5 млн. шт./год линз объектива и окуляра.

- «Красногорский механический завод» - производивший до 1 млн. шт./год фотоаппаратов мод. «Зенит».

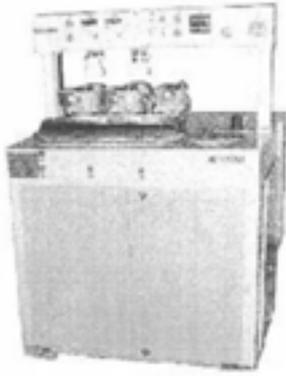
- Завод «Зенит» в г. Вилейка (Белоруссия)

– выпускавший до 600 тыс. шт./год фотоаппаратов мод. «Зенит» и другие.

Все эти заводы в 90-е годы прекратили выпуск вышеперечисленной продукции в связи с резким падением спроса с одной стороны и практически одновременно заполонившими наш внутренний рынок импортными изделиями ТНП Японского, Китайского и стран Юго-Восточной Азии массового производства оптических деталей.

Массовое производство оптических деталей на заводах оптического приборостроения Советского Союза проводилось в основном на шлифовально-полировальных (ШП) и полировально-доводочных (ПД) станках (рис. 1, рис. 2), работающих по технологии «свободного» притира за исключением обработки заготовки (прессовки) на станках типа «Алмаз-70» 4-х модификаций, станков мод «Мениск-70», «АШС-35», «АШС-35М», «АШС-100» предварительного шлифования линз в «жестких» осях кольцевым алмазным инструментом.

Технология «свободного притира» требует применения большой номенклатуры специального дорогостоящего инструмента и технологического оснащения, хотя сами станки достаточно просты по конструкции в связи с отсутствием повышенных требований к точности движений и жесткости исполнительных органов и механизмов. Этим и можно



**Станок шлифовально-полировальный «ШП-50М»**

Предназначен для тонкого шлифования алмазным инструментом и полирования сферических и плоских поверхностей ОД или блоков диаметром от 15 до 50 мм



**Станок шлифовально-полировальный «ЗШП-320»**

Предназначены для тонкого шлифования и полирования плоских и сферических поверхностей заготовок оптических деталей или блоков методом притира с применением свободного абразива



**Станок шлифовально-полировальный «6ШП-100М»**

*Рисунок 1.*

*Станки шлифовально-полировальные «ШП-50М», «ЗШП-320», «6ШП-100М»*

объяснить «долговечность» их использования до настоящего времени.

Как правило, на операцию шлифования (грубого и тонкого) требуется, примерно, в 3 раза меньше времени, чем на операцию полирования. Чтобы уравнивать время обработки оптической детали (ОД) на этих двух операциях, необходимо при работе одного шлифовального станка (шпинделя) использовать для полирования три станка (шпинделя), что, естественно, приводит к увеличению технологической цепочки станочного оборудования.

В идеальном варианте это соотношение должно быть доведено до 1:1, т.е. технологическая цепочка должна состоять из одного шлифовального и одного полировального станков, при этом время обработки на обеих операциях должно быть примерно одинаковым.

Для осуществления тонкого алмазного шлифования кольцевым алмазным инструментом (ТАШ КИ) требуются прецизионные станки высокой жесткости.

Немецкими специалистами фирм OptoTech, Satisloh, Schneider было создано оборудование (рис. 3) и разработана технология, которая позволила настолько улучшить шероховатость поверхности после шлифования, что время, затрачиваемое на полирование, сократилось до уровня операции тонкого шлифования.

По разработанной технологии шлифование сферических поверхностей осуществляется в три перехода за одну установку.

Грубое и тонкое шлифование осуществляется комбинированным кольцевым алмазным инструментом, а тонкое (супертонкое) шлифование осуществляется сферическим инструментом с алмазными «пяточками», установленном на втором инструментальном шпинделе шлифовального станка. Кинематика операции супертонкого шлифования идентична процессу полирования, при котором притирочный инструмент осциллирует в плоскости, проходящей через верхнюю точку линзы. Результатом обработки по данной технологии является шлифованная поверхность, позволяющая осуществить ее интерференционный контроль. Отечественное оборудование такого уровня не производится.

В 1998-2008 гг. были профинансированы из бюджета две научно-исследовательские программы союзного государства (Россия-Республика Беларусь).

В результате выполнения этих программ инженерно-техническими и производственными коллективами АО НПО «Оптика» (г. Москва), РУП ОС и ВТ (Республиканское унитарное предприятие оптического станкостроения и вакуумной техники) г. Минск, СЗОС (Сморгонский завод оптического станкостроения) г. Сморгонь (Белоруссия) были



**Рисунок 2.**

**Станки полировальные, шлифовально-полировально-доводочные «2П-100К», «3П-30», «2ШПД-200»**

разработаны, изготовлены и испытаны 59 наименований опытных образцов станков типа ШП, П, ШПД, «АШС», центрировочных станков типа «ЦС» и автоматизированных полировально-доводочных станков типа «АПД» и др.

При разработке станков закладывались не только существующая современная на тот момент времени элементная база (двигатели, привода, электротехнические изделия, программное обеспечение и пр.), но и новые конструкторские решения, позволяющие реализовывать вышеизложенные варианты соотношения 1:1 времени шлифования и полирования.

Конструкцией верхнего звена (рис. 4) станка обеспечивается конусообразное, осцилляционное перемещение поводка с вершиной конуса в центре обрабатываемой сферической поверхности, что обеспечивает эквидистантный съём поверхности обрабатываемой оптической детали после тонкой (супертонкой) шлифовки, полученной после обработки в жестких осях на прецизионных

станках кольцевым алмазным инструментом.

То есть практически десять лет назад российскими и белорусскими конструкторами и технологами были намечены пути повышения процента выхода годных ОД при одновременном повышении качества и снижении трудоемкости.

Результаты выполнения программы союзного государства были реализованы в заявках предприятий России и Республики Беларусь на поставку созданных сферошлифовальных, шлифовально-полировальных, заготовительных, полировально-доводочных станков в количестве 67 ед. (данные на 31.12.2010 г.) и продолжают в настоящее время.

Финансирование работ по дальнейшему развитию оптической технологии и отечественного или российско-белорусского станкостроения прекратилось и до сегодняшнего дня не находит положительного решения в вышестоящих организациях.

Сотрудниками АО «НПО «Оптика» совместно с сотрудниками ОАО «Оптическое станкостроение и вакуумная техника»



**Рисунок 3.**

**Полировальный станок SPK 50 CNC фирмы OptoTech**

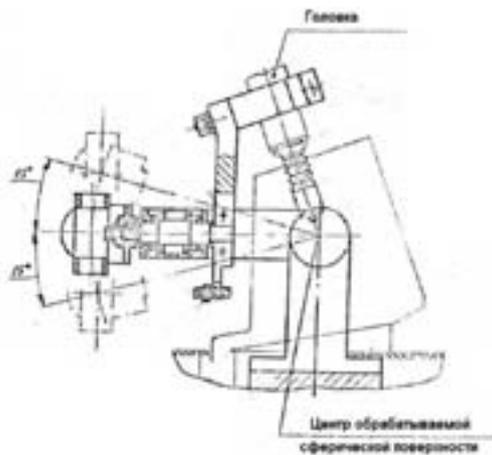


Рисунок 4.

Кинематическая схема верхнего звена станка



Рисунок 4.

Станок NLP 125 DAP-4, фирмы Stock Konstruktion GMBH

(г. Минск) были подготовлены две программы:

- научно-техническая программа развития отечественного станкостроения Российской Федерации «Оптика России»;
- концепция научно-технической программы союзного государства «Оптика-СГ», согласованная с Министерством промышленности Республики Беларусь.

Обе эти программы были рассмотрены на Совете Главных оптиков Холдинга АО «Швабе», одобрены, подписаны руководством Холдинга АО «Швабе», направлены в 2016 г. на согласование в Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, но до настоящего времени не нашли положительного решения.

В то же время инвестиционные бюджетные средства, выделенные на техпереворужение, в том числе и оптического производства, расходуются многочисленными предприятиями на закупку ШП, ПД станков фирмы Stock Konstruktion GMBH (Германия) мод. NLP, работающих по классической технологии «свободного» притира (рис. 5), ничем не отличающейся от ранее разработанных отечественных аналогов.

Отсутствие в течение десятилетий необходимой государственной поддержки привело, в конечном итоге, к полному развалу отечественного оптического станкостроения.

Потери квалифицированных, в основном уже ушедших на заслуженный отдых опытных конструкторско-технологических кадров привело к тому, что в стратегиях развития отечественного производства раздел «Оптическое станкостроение» отсутствует.

Понимая всю важность и необходимость оптики практически для всех отраслей промышленности, руководство страны и Министерство оборонной промышленности СССР в 50-60 годы посчитало необходимым организовать специальную бригаду специалистов технологов и конструкторов отрасли (от ГОИ им. С.И. Вавилова Качанов А.Л., Окатов М.А., от ЛОМО Бургов В.А., от КОМЗа Касаткин А.С., Фрейдберг Л.А., от ММЗ Шпаковский М.А. и др.) сначала для изучения импортного оборудования фирм «Карл Цейсс» и в дальнейшем последующей организации разработки и серийного производства отечественных станков на ММЗ им. С.И. Вавилова в г. Минске, а затем создания специального КБ оптического станкостроения и станкостроительного цеха. В дальнейшем в 1958-1971 гг. созданы ФГУП «НПО «Оптика», институт «Оптического станкостроения и вакуумной техники» в г. Минске и завод оптического станкостроения в г. Сморгонь (Белоруссия). Создавалось и изготавливалось для оснащения оптических производств более 1000 ед. оптических станков в год различных моделей (ШП, ШПД, ПД, Ш и т.д.) и 200 ед. различных моделей вакуумных установок (ВУ).

Это обеспечило массовое производство оптических деталей на всех вновь создаваемых и модернизируемых оптических производствах предприятий бывшего Советского Союза.

Приверженность принципу «все купим» в сегодняшних условиях экономических санкций, мягко говоря, не совсем оправдана.

The logo for Buhler, featuring a stylized teal 'B' inside a white circle, followed by the word 'BUHLER' in a bold, teal, sans-serif font. The background of the entire advertisement is a dynamic, abstract composition of swirling teal and purple colors, with a central, glowing, multi-colored sphere that resembles a planet or a lens.

# BUHLER

**Оптико-механическим заводам**

**Отдел «Прогрессивные материалы»  
компания Бюлер предлагает**

*производственно-технологические решения для:*

- нанесения прецизионных вакуумных покрытий*
- изготовления деталей из литого алюминия*
- изготовления паст различного назначения*



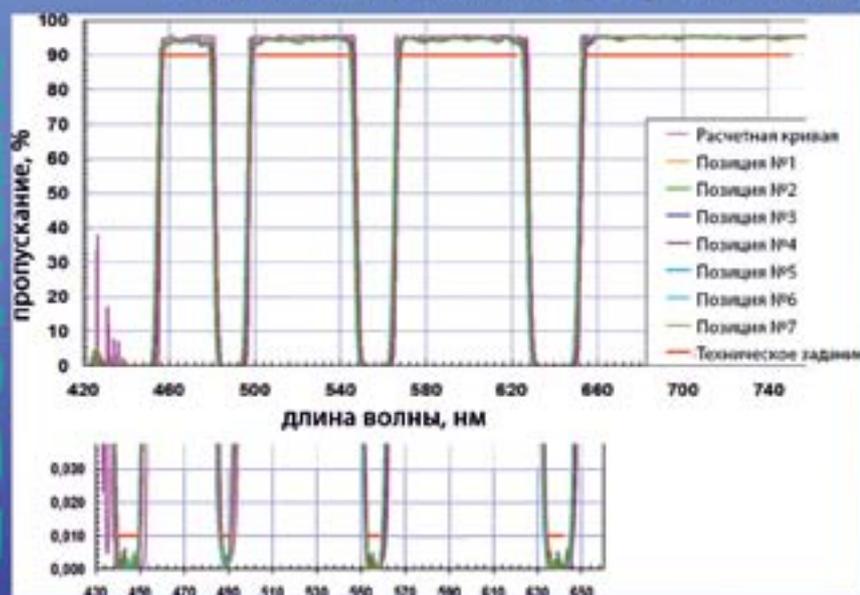
# ВАКУУМНЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ МАГНЕТРОННОГО ТИПА СЕМЕЙСТВА HELIOS НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ (ШЛЮЗОВЫЕ)

Установки обеспечивают нанесение прецизионных покрытий большой плотности из атомарных слоев оксидов с высочайшей равномерностью и воспроизводимостью.



Установки позволяют производить светофильтры с уникальными оптико-механическими характеристиками как на стандартных оптических деталях, так и на кремневых пластинах (в последнее время широко применяется в микроэлектронике).

Пример 4-полосного режекторного фильтра. Время нанесения -14 часов.  
Нижний фрагмент графика показывает уровень блокировки на определенных длинах волн.



Структура фильтра:  
Материалы слоев:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BiO}_2$   
Количество слоев: 201  
Полная толщина: 20 микрон  
Толщина  $1\text{M}\beta 205$ : 16 микрон  
Тонкие слои  $\text{BiO}_2$ : 3...12нм  
Управление толщинами наносимых слоев:  
Прямой оптический контроль  
в сочетании с управлением по времени

# ОТДЕЛ LEYBOLD OPTICS ФИРМЫ БЮЛЕР

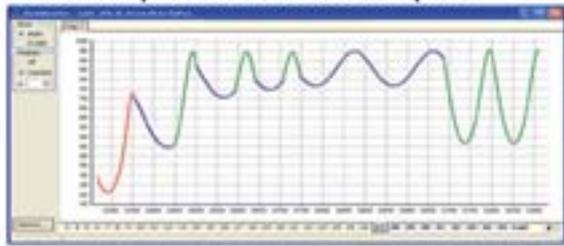
ПРЕДСТАВЛЯЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ  
СЕМЕЙСТВО ВАКУУМНЫХ НАПЫЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК SYRUSPRO  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО И ТЕРМИЧЕСКОГО ТИПА  
С ДИАМЕТРОМ ВАКУУМНЫХ КАМЕР ОТ 710 ДО 2800 ММ.



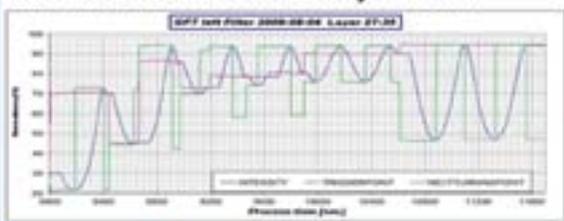
Уже в базовой комплектации эти установки имеют следующее оснащение:

- **полностью автоматическая система управления** технологическим процессом от закрытия камеры с загруженными подложками до извлечения из нее готовых фильтров;
- **источник ионно-плазменного ассистирования** для оптимизации плотности, твердости, адгезии и коррозионной стойкости покрытий, скорости их нанесения, регулирования механических напряжений, коэффициентов преломления и рассеяния наносимых слоев;
- **система оптического контроля по детали** на держателе подложек исключает человеческий фактор при производстве заранее рассчитанных и отработанных покрытий;
- **программное обеспечение для моделирования работы оборудования.** Позволяет отрабатывать технологию нанесения покрытий в вычислительном эксперименте - без задействования оборудования, расходования испарительных материалов и энергии.

Расчетная кривая оптического контроля

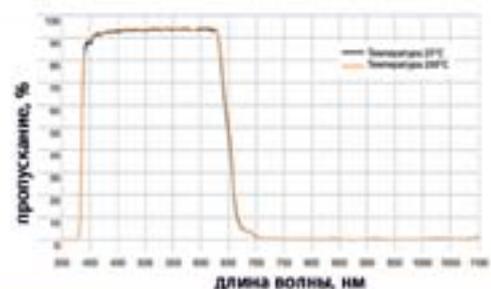


Кривая оптического контроля, измеренная системой OMS напылительной установки



Система оптического контроля на просвет непосредственно по детали на держателе подложек гарантирует идентичность оптических характеристик всех деталей как в каждом цикле, так и в разных партиях.

Оптические покрытия, нанесенные с ионно-плазменным ассистированием стабильны в широком диапазоне температур.



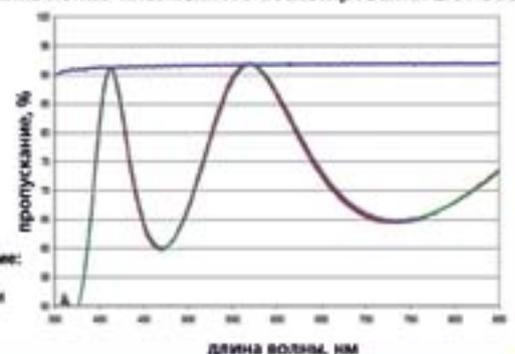
Характеристики слоя оксида титана, полученного с использованием источника ионно-плазменного ассистирования LION300

Скорость роста:  
0,6нм/сек

Толщина:  
138нм

Показатель преломления:  
2,54 @ 400нм  
2,52 @ 500нм  
2,46 @ 550нм  
2,35 @ 1064нм

Низкое поглощение:  
7ppm@1064нм  
 $d^{10}n=4M$  @ 1064нм



# ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ БЮЛЕР ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ



Мы предлагаем следующую продукцию и услуги:

- горизонтальные холоднокammerные машины Evolution, Carat, EcolinePro, периферийные устройства, разработка пресс-форм
- инжиниринг, начиная с первых набросков проекта до серийного производства, консультации и обучение
- восстановление и модернизация литейного оборудования Бюлер
- сервисное обслуживание и поставка запасных частей за рубли (склад и сервисная станция в с. Беседы, Московская область)
- исследования и разработки в технологических центрах Швейцарии Индии, Китая.

## Мельницы и краскотерки для измельчения и диспергирования.

Используется при производстве таких материалов как:

- стеклянные, керамические и металлосодержащие пасты
- нанодисперсии различного назначения
- анодные и катодные пасты Li-Ion батарей
- лако-красочные защитные покрытия
- уплотнительные и клеевые пасты





**3-я научная рота войск воздушно-космической обороны  
создана 10 декабря 2013 года во исполнение приказа  
Министра обороны Российской Федерации  
№ 404 от 28.05.2013 года «Об утверждении положения  
о научных ротах» и приказа командующего войсками  
Воздушно-космической обороны № 80 от 31.05.2013 года  
«О создании научной роты» на базе Центра войсковой  
части 26302 в городе Красногорске при поддержке  
ОАО «Красногорский завод им.С.А.Зверева».**

**Основными направлениями научной деятельности являются:**

**1) на ОАО «Красногорский завод им.С.А.Зверева»**

- системы управления огнем**
- совершенствование узлов бронетанковой техники**
- дистанционное зондирование Земли**
- оптико-электронные комплексы контроля космического пространства**

**2) в НИИЦ ЦНИИ Войск ВКО**

- системы контроля космического пространства**
- системы предупреждения о ракетном нападении**
- системы противоракетной обороны...**

**НАУЧНАЯ РАБОТА**  
**3-й РОТЫ ВОЙСК ВКО за 2016 – 2017 годы**

*Военнослужащие научной роты принимали участие в шестнадцати научных мероприятиях, конференциях, симпозиумах, выставках.*

*22 апреля 2016 года 7 военнослужащих научной роты приняли участие и были награждены памятными дипломами в I Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной, противоракетной обороны, космических войск Воздушно-космических сил», проводимой на базе Военного института МГТУ им. Н.Э. Баумана.*

*27 мая 2016 года двое военнослужащих 3 научной роты приняли участие в научно-практической конференции на тему: «Комплектование воинских должностей специалистами, имеющими высшее и среднее профессиональное образование». На конференции была продемонстрирована методика обработки информации, получаемой с помощью статистического Фурье-спектрометра.*

*Операторы научной роты принимали участие в Международных олимпиадах по математике и информатике, где заняли второе и третье место соответственно.*

*Ефрейтор Лавриненко К.А. занял второе место в ежегодном конкурсе профессионального мастерства в Национальном центре управления обороной РФ по определению лучших специалистов в области управления войсками и лучших расчетов дежурных смен центров управления ВС РФ «Центр управления».*



*Участие операторов 3 научной роты в выставке  
в Национальном центре управления обороной МО РФ*

*5 операторов научной роты в период с 6 по 11 сентября приняли участие в Международном военно-техническом форуме «Армия-2016».*

*На данном мероприятии были представлены макет статического Фурье-спектрометра и экспериментальный образец привода имитатора движения местности для перспективной гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. Экспозицию научных рот ВС РФ посетили Министр обороны Российской Федерации, его заместители и другие должностные лица. Разработки операторов 3 научной роты заинтересовали посетителей экспозиции, и были по достоинству оценены участниками научно-деловой программы.*

*В период с 4 по 7 октября 2016 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана была организована XI Всероссийская инновационная молодежная научно-практическая выставка «Политехника». В работе выставки принимали участие студенты, аспиранты и молодые ученые технических вузов, научно-исследовательских институтов РФ, а также операторы и командование 3 научной роты. Экспозицию 3 научной роты посетили эксперты, в том числе профессорско-преподавательский состав военного института МГТУ им. Н.Э. Баумана, представители НИИЦ ЦНИИ ВВКО, 27-го Центрального научно-исследовательского института МО РФ, вневедомственного экспертного совета ВКС, члены иностранных делегаций, а также корреспонденты телеканала «Звезда». На церемонии закрытия выставки операторы 3 научной роты были награждены дипломами, грамотами и памятными подарками.*



*Операторы научной роты представляют результаты научной деятельности на выставке «Политехника»*

*20 октября 2016 г. прошла научно-техническая конференция «Проблемы создания и испытаний вооружения ракетно-космической обороны» на базе НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВВКО. Операторы научной роты выступили с докладами на 3-х секциях конференции:*

*«Системы противоракетной обороны»;*

*«Системы предупреждения о ракетном нападении»;*

*«Системы контроля космического пространства».*

*Участовавшие операторы были награждены грамотами и почетными дипломами.*

*В период с 14 по 18 ноября 2016 года операторы научной роты приняли участие в четырнадцатой всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов» на базе Института космических исследований Российской академии наук. Военнослужащие приняли участие в секции «Вопросы создания и использования приборов и систем для спутникового мониторинга состояния окружающей среды».*

*23 и 24 ноября 2016 года операторы научной роты, занимающиеся научной деятельностью в НТЦ ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева» и в ПАО «Корпорация «Комета» успешно прошли аттестацию на предмет совершенствования критериев оценки научной деятельности и оценки эффективности научно-исследовательских работ. В результате данного мероприятия операторы роты получили опыт представления результатов научно-исследовательской деятельности. Членами аттестационной комиссии были скорректированы индивидуальные планы научной работы операторов 3-й научной роты и проконтролированы сроки их выполнения.*

*Операторы научной роты приняли участие в конкурсе на лучшую научную работу по тематике Главного испытательного космического центра.*

*В номинации «Лучшие научные работы курсантов, студентов, операторов научных рот». Совместная работа командира взвода старшего лейтенанта Злобарь А.А. и трех операторов научной роты Аникина Д.О., Сараева А.А. и Сироткина В.С., «Создание каталога звездного неба» заняла 3 место.*



*Ефрейтор Резов А.С. на тематической выставке  
в Национальном центре управления обороной*

*11 января 2017 года в Национальном центре управления обороной Российской Федерации была организована выставка, на которой демонстрировали свои достижения 3-я научная рота Космических войск Воздушно Космических сил. Операторы научной роты под руководством коман-*

*дира роты капитана Парамонова А.А., представляли 2 работы: ефрейтор Родионов А.Д. – макет статического Фурье-спектрометра, рядовой Резов А.С – прототип программы модуля обработки видеок кадров звёздного неба больших размеров для перспективной оптической станции системы контроля космического пространства.*

*2 марта 2017 года операторы 3 научной роты приняли участие в конференции «Военная безопасность РФ: взгляд в будущее» на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана, на которой обсуждались следующие вопросы:*

- Геополитические и военные угрозы безопасности России*
- Политические и правовые аспекты военной безопасности Российской Федерации*
- Военно-техническая политика России*
- Военная безопасность Отечества в историческом измерении: опыт прошлого и вызовы современности.*

*Операторы представляли три работы: рядовой Самбаров Г.Е. - Исследование возмущающих действий на движение высокоорбитальных космических объектов; рядовой Куркин М.С. – Имитационная модель СУОС КА в составе КСг. СККП; рядовой Акимов Е.В. –*



*Участие операторов 3 научной роты в выставке  
«Фотоника-2017»*

*Социально-экономическая проблема развития интеллектуального потенциала России. Доклады операторов с интересом выслушали и высоко оценили организаторы конференции, а также генералы и офицеры, посетившие конференцию.*

*20 и 21 марта в ОАО «Корпорация «Комета» прошла конференция молодых специалистов, на которой было представлено множество сильных и интересных работ в различных областях науки.*

*Операторы 3-й Научной роты представили три работы: Ефрейтор Пахомов Ю.С. выступил с докладом: «Разработка алгоритма формирования циклограммы работы комплекса связи со сложной топологией».*

*Ефрейтор Степанов А.А. представил результат своей работы по теме: «Визуализация результатов обработки специальной информации».*

*Рядовой Коротков Е.О. рассказал о направлении своего исследования по теме: «Разработка программно-алгоритмического обеспечения для организации вычислительного кластера имитационно-моделирующего стенда».*

*Доклады операторов с интересом выслушали и высоко оценили как организаторы конференции, так и ее посетители.*

*С каждым из операторов научной роты после его выступления аудитория активно вступала в дискуссию по теме доклада и с интересом обсуждала проблематику и новизну научного исследования.*

*27 марта на Коллегии Министерства обороны Российской Федерации проводилась тематическая выставка, на которой оператор 3 научной роты ефрейтор Резов А.С. представлял результаты своей работы по перспективным алгоритмам обработки изображений больших размеров Министру Обороны, его заместителям, Командующим видами и родами войск и другим должностным лицам. Стоит отметить исключительность 3 научной роты – докладов от других научных рот не производилось.*

*В период с 27 по 31 марта проводилась Всеармейская олимпиада по иностранному языку на базе Военной академии связи им. маршала С.М. Буденного. Старший команды – старший лейтенант Злобарь А.А., состав команды – рядовые Молчанов Е.А., Берлев М.М., Беляев И.В., Самсонов В.Б.*

*Личный состав 3 научной роты показал высокие результаты и по итогам занял 3 место во внеконкурсном зачете и*

*1 место среди научных рот. А рядовой Молчанов Е.А. занял третье место в личном первенстве.*

*7 марта в Московском Авиационном Институте прошла Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», приуроченной к 100-летию со дня рождения выдающегося конструктора В.П. Мишина. Гагаринские чтения являются площадкой для обсуждения молодыми учеными научных исследований в области инновационных аэрокосмических технологий.*

*Операторы 3-й Научной роты рядовые Шуваев И.Н., Самбаров Г.Е., Акимов Е.В., Куркин М.С. представляли 4 работы. Доклады операторов с интересом выслушали и высоко оценили организаторы конференции, студенты, аспиранты, молодые ученые, а также преподаватели и профессора, посетившие секцию «Управление движением, навигация и бортовые системы».*

*В период с 10 по 13 апреля проводился Всеармейский этап Международной олимпиады по математике на базе Военного университета МО РФ.*



*Команда 3 научной роты на Всеармейской олимпиаде по иностранному языку*



*Операторы 3 научной роты на конференции «Гагаринские чтения» в МАИ*



*Операторы 3 научной роты на Всеармейском этапе III Международной олимпиады по математике*



*Операторы 3 научной роты на симпозиуме в ВКА им. А.Ф. Можайского*

*Старший команды – лейтенант Литвинов С.А., состав команды – рядовые Кузнецов Т.В., Смирнов А.В., Борбенчук А.С., Чернышев А.О. Личный состав 3 научной роты показал высокие результаты и по итогам занял 2 место во внеконкурсном зачете и 1 место среди научных рот. А рядовой Смирнов А.В. занял 1 место в личном первенстве.*

*В период с 18 по 19 апреля операторы 3 научной роты ефрейтор Родионов А.Д. и рядовые Васенков С.В. и Лебедев И.И. приняли участие в симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» на базе ВКА им. А.Ф. Можайского. Рядовые Васенков С.В. и Лебедев И.И. докладывали на секции №2, посвященной теоретическим и прикладным вопросам рассеяния радиоволн, обработки радиолокационных сигналов, сверхширокополосной локации, об исследовании прохождения радиосигнала через плазмообразование ракеты в процессе полета с помощью когнитивной графики. Ефрейтор Родионов А.Д. докладывал об обзоре земной и водной поверхности.*

*Практика показывает, что служба в Вооруженных Силах в Российской Федерации, в течении одного года, позволяет решать задачи подготовки перспективных офицеров для армии и пополнения инженерных кадров оборонных предприятий, научно-исследовательских институтов высококвалифицированными и заинтересованными в дальнейшей работе кадрами выпускников ВУЗов страны.*

*Младший научный сотрудник  
3-й научной роты войск ВКО  
А.А.Поздняков*

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СБАЛАНСИРОВАННОМ ДВИЖЕНИИ НЕУПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТЫ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА

ЗУБКОВ Г.А. – старший оператор 3-й научной роты КВ ВКС



*В статье рассматриваются разработка программы расчета параметров траектории неуправляемой баллистической ракеты. Также проводится расчет величины отклонений координат точек падения по дальности стрельбы при действии возмущений, определяются соответствующие поправочные коэффициенты.*

*Зубков Г.А.*

**Ключевые слова:** баллистика, неуправляемая баллистическая ракета, возмущающие факторы.

## METHOD FOR CALCULATING BALLISTIC CHARACTERISTICS FOR BALANCED LONGITUDINAL MOTION OF AN UNCONTROLLED MISSILE, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF WIND

ZUBKOV G.A.

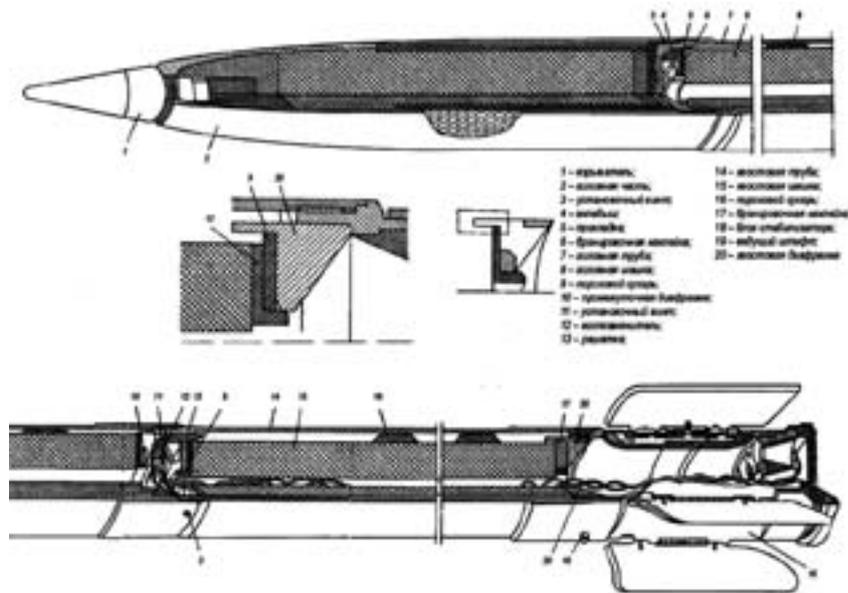
**Annotation.** *The article deals with the development of a program for calculating the parameters of the trajectory of an uncontrolled ballistic missile. Additionally, it deals with the calculation of the deviation of the coordinates of the points of incidence on the range of fire under the influence of perturbing factors, the corresponding correction factors are determined.*

**Keywords:** Ballistics, uncontrolled ballistic missile, perturbing factors.

### ВВЕДЕНИЕ

Дальность стрельбы, траектория движения, способ стабилизации и управления и другие баллистические и конструктивные характеристики ракет непосредственно связаны с их назначением. В зависимости от расположения стартовой установки и цели принято разделять ракеты на четыре класса: «земля-земля», «земля-воздух», «воздух-воздух», «воздух-земля». Кроме того, ракеты разделяют на управляемые и неуправляемые.

Управляемая ракета снабжается системой управления и обладает свойством принудительно изменять характеристики движения в процессе полета. Если же ракета не имеет системы управления, то она называется неуправляемой. Неуправляемыми бывают реактивные снаряды, тактические ракеты, противотанковые, зенитные, авиационные и другие. На рис. 1 представлена конструктивная схема неуправляемого реактивного снаряда.



**Рисунок 1.**  
**Схема неуправляемого реактивного снаряда М-210Ф**  
**(индекс 9М22У) калибра 122 мм**

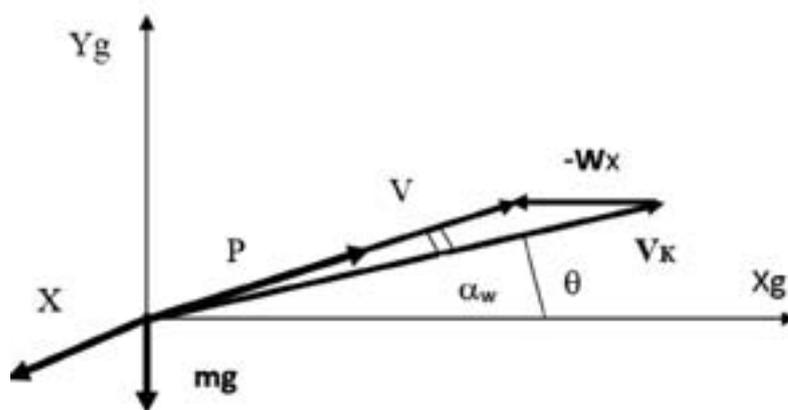
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

Продольное движение неуправляемой баллистической ракеты рассматриваем в нормальной земной системе координат с учетом следующих допущений:

- ракета является осесимметричным, статически устойчивым твердым телом переменной массы;
- продольная ось ракеты в любой момент времени направлена по вектору воздушной скорости (сбалансированное движение);

- кривизну Земли не учитываем;
- динамические уравнения движения центра масс ракеты записываем в проекциях на касательную и нормаль к траектории.

Расположение векторов скоростей, сил и углов в нормальной земной системе координат, где:  $Ox_g Y_g$  - оси нормальной земной системы координат;  $V_k$  - траекторная скорость;  $V$  - скорость относительно подвижной атмосферы;  $W_x$  - скорость продольного горизонтального ветра;  $\theta$  - угол наклона



**Рисунок 2.**  
**Расположение векторов скоростей, сил и углов в нормальной земной системе координат, где:**  
 **$Ox_g Y_g$  - оси нормальной земной системы координат;  $V_k$  - траекторная скорость;**  
 **$V$  - скорость относительно подвижной атмосферы;  $W_x$  - скорость продольного горизонтального ветра;**  
 **$\theta$  - угол наклона траекторной скорости;  $\alpha_w$  - угол между воздушной и траекторной скоростями;**  
 **$P$  - сила тяги;  $X$  - сила тяги;  $mg$  - сила тяжести**

траекторной скорости;  $\alpha_w$  - угол между воздушной и траекторной скоростями;  $P$  - сила тяги;  $X$  - сила тяги;  $mg$  - сила тяжести.

При заданных допущениях дифференциальные уравнения продольного движения неуправляемой ракеты можно записать в следующем виде:

$$m \frac{dV_k}{dt} = (P - X) \cos \alpha_w - mg \sin \Theta \quad (1)$$

$$m V_k \frac{d\Theta}{dt} = (P - X) \sin \alpha_w - mg \cos \Theta \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = V_k \sin \Theta \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_k \cos \Theta \quad (4)$$

К этим уравнениям необходимо добавить уравнения связи, позволяющие определять кинематические параметры:

$$\operatorname{tg} \alpha_w = \frac{W_x \sin \Theta}{V_k - W_x \cos \Theta} \quad (5)$$

$$V = \sqrt{V_k^2 + W_x^2 - 2V_k W_x \cos \Theta} \quad (6)$$

$$q = 0.5 \rho V^2 \text{ - скоростной напор,} \quad (7)$$

$$M = \frac{V}{a} \text{ - число Маха,} \quad (8)$$

$$n_x = \frac{dV_k}{dt} + \sin \Theta \text{ - продольная перегрузка} \quad (9)$$

Формулы для определения сил, действующих на ракету:

$$P = P_p - S_a p \text{ - сила тяги, где} \quad (10)$$

$$P_p = \frac{dm}{dt} \cdot W_e \text{ - сила тяги в пустоте,} \quad (11)$$

$S_a$  - площадь выходного сечения сопла двигателя,

$p$  - давление воздуха,

$W_e$  - эффективная скорость истечения газов,

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_0 - m_k}{t_k} \text{ - секундный расход массы топлива,} \quad (12)$$

$m_0, m_k$  - начальная и конечная массы ракеты,

$t_k$  - время работы двигателя.

$mg$  - сила тяжести, где обозначено:

$$m = m_0 - \left(\frac{dm}{dt}\right) \cdot t \text{ - текущая масса ракеты (} 0 < t < t_k \text{),} \quad (13)$$

$g = 9,80665 = \text{Const}$  - ускорение силы тяжести.

$X = S_m q C_x$  - сила лобового сопротивления, где обозначено:

$S_m$  - площадь миделевого сечения,

$C_x$  - аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления,

$\rho$  - плотность воздуха.

Для неуправляемых ракет небольшой дальности стрельбы аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления обычно задается в виде табличных зависимостей от чисел Маха отдельно на активном (АУТ) и пассивном (ПУТ) участках траектории.

В табл. 1 даны величины аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления для неуправляемой баллистической ракеты.

Текущие значения величин аэродинамических коэффициентов силы лобового сопротивления определяют из таблицы путем интерполирования.

При использовании линейной интерполяции текущее значение аэродинамического коэффициента силы лобового сопротивления определяют по следующей формуле:

**Таблица 1.**  
**Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_x$  в зависимости от числа Маха**

<b>M</b>		0,25	0,5	0,75	0,9	1,0	1,10	1,25	1,5	2,0	3,0
<b>C<sub>x</sub> (АУТ)</b>	0,30	0,30	0,31	0,38	0,51	0,56	0,59	0,58	0,52	0,44	0,42
<b>C<sub>x</sub> (ПУТ)</b>	0,32	0,32	0,33	0,41	0,54	0,60	0,63	0,62	0,56	0,49	0,46

$$C_x(M) = C_x(M_n) + [C_x(M_{n+1}) - C_x(M_n)] \frac{M - M_n}{M_{n+1} - M_n}$$

$$(M_n \leq M \leq M_{n+1}) \quad (14)$$

где:  $M_n, M_{n+1}$  – значения чисел Маха из соседних столбцов таблицы.

Параметры атмосферы определяются по таблицам или формулам стандартной атмосферы (ГОСТ4401-81). Для неуправляемых баллистических ракет, высота траекторий которых менее десяти километров, можно использовать следующие формулы расчета параметров атмосферы:

$$T = 288,15 - 0,0065y \text{ – температура воздуха (y(м) - высота полета),} \quad (15)$$

$$a = 20,047T \cdot 0,5 \text{ – скорость распространения звука,} \quad (16)$$

$$p = 101325 \exp(0,034163y/T) \text{ – давление воздуха,} \quad (17)$$

$$\rho = \frac{p}{287,053 \cdot T} \text{ – плотность воздуха} \quad (18)$$

Расчет параметров траектории ведется с заданным шагом интегрирования ( $\Delta t_{\text{инт}} = 0,1$  сек).

Поэтому на момент окончания расчетов ( $y_n < 0$ ) получаем дальность ( $x_n$ ) несколько большую дальности стрельбы. Для получения точного значения дальности стрельбы используем следующую формулу:

$$x_c = x_n - y_n / \operatorname{tg} \theta_n,$$

где: параметры  $x_n, y_n, \theta_n$  являются величинами последней расчетной точки интегрирования.

### ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

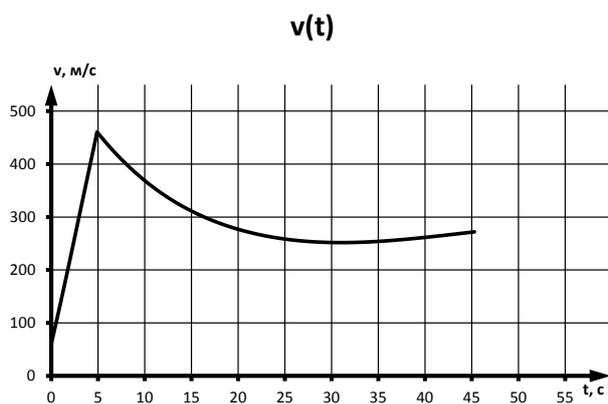


Рисунок 3.

Зависимость траекторной скорости от времени

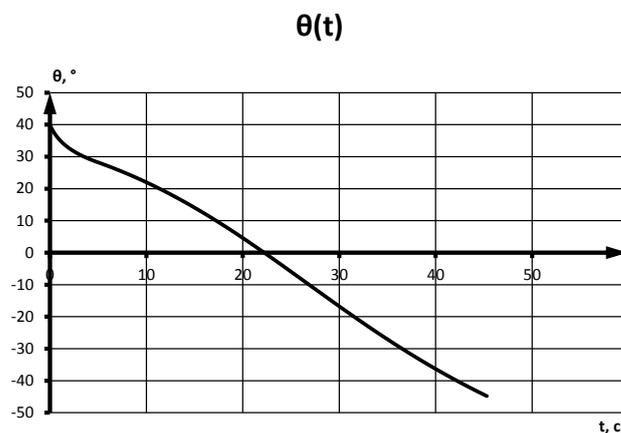


Рисунок 5.

Зависимость угла наклона траектории от времени

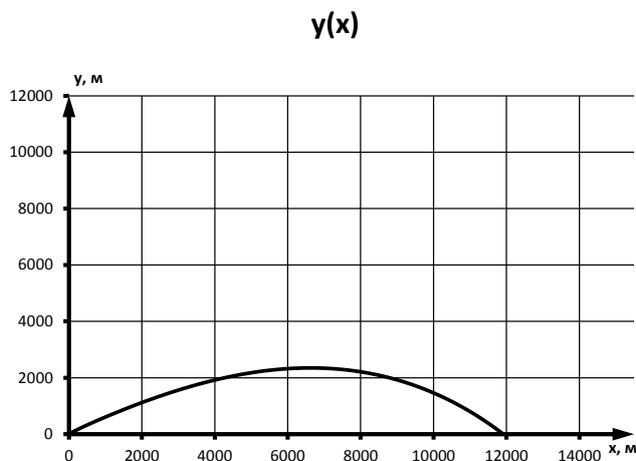


Рисунок 4.

Зависимость высоты от дальности полета

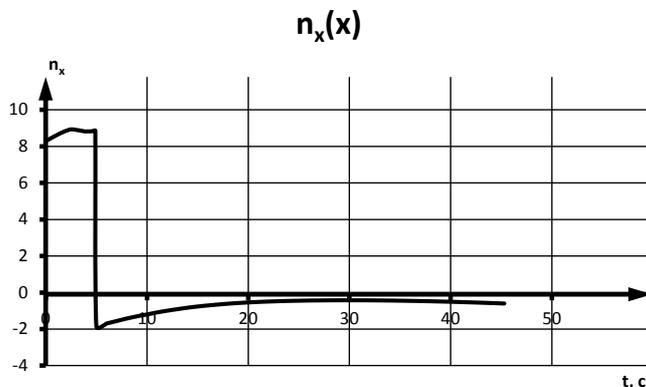


Рисунок 6.

Зависимость продольной перегрузки от времени

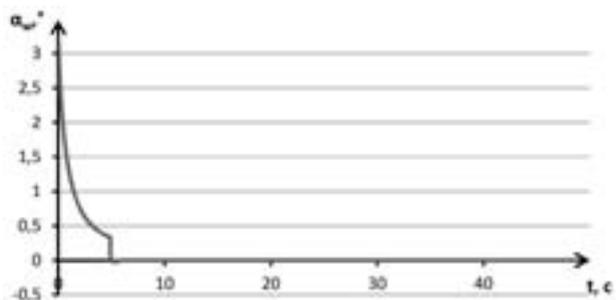


Рисунок 7.

Зависимость угла между воздушной и траекторной скоростями при наличии ветра на АУТ

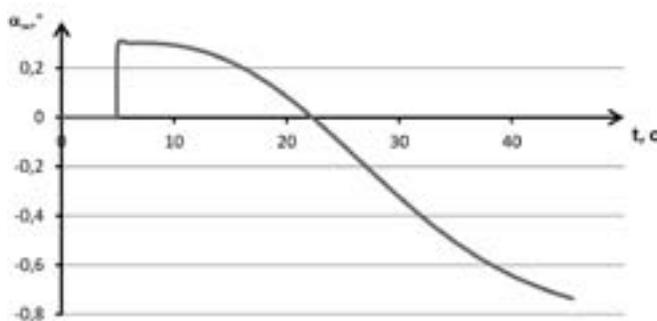


Рисунок 8.

Зависимость угла между воздушной и траекторной скоростями при наличии ветра на ПУТ

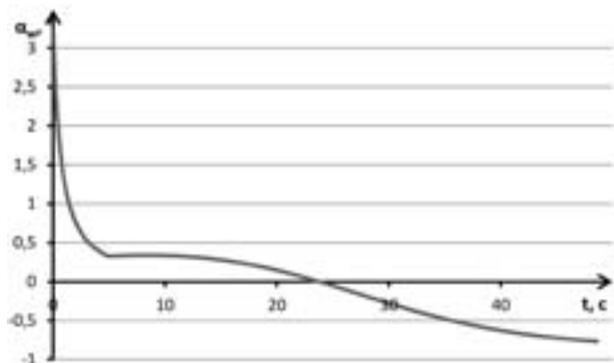


Рисунок 9.

Зависимость угла между воздушной и траекторной скоростями при наличии ветра на всей траектории

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Увеличение/уменьшение начальной скорости приводит к увеличению/уменьшению дальности полета. Это объясняется увеличением/уменьшением конечной скорости стрельбы при увеличении/уменьшении начальной, а также уравнением  $x = \int V_k \cos \theta d t$ .
2. В зависимости дальности полета от угла наклона траектории существует максимум, соответствующий оптимальному углу бросания. Таким образом, увеличение дальности достигается приближением угла  $\theta_0$  к опти-

Таблица 2.

Отклонения координат точек падения по дальности при действии различных возмущений

Возмущения	Дальность, м	Поправочный коэффициент
номин.	11916.5	-
$\delta V_{k0+}$	12117.8	40.90
$\delta V_{k0-}$	11708.8	
$\delta \theta_0+$	11931.7	153.00
$\delta \theta_0-$	11901.1	
$\delta m_0+$	11730.9	-37.28
$\delta m_0-$	12103.7	
$\delta m_T+$	12614.1	346.93
$\delta m_T-$	11226.4	
$\delta W_{e+}$	11978.6	6.21
$\delta W_{e-}$	11854.5	
$\delta t_{k+}$	11839.2	-770.50
$\delta t_{k-}$	11993.3	
$\delta \rho/\rho+$	11697.7	-44.98
$\delta \rho/\rho-$	12147.5	
$\delta C_x+$	11697.7	-44.98

Таблица 3.

Отклонения координат точек падения по дальности при наличии ветра

Ветер	Дальность, м	Отклонение, м
нет	11916.5	-
на АУТ	12304.5	388.0
на ПУТ	12046.9	130.4
на всей траектории	12445.7	529.2

мальному. В данном случае  $\theta_0 < \theta_{0opt}$ , поэтому увеличение  $\theta_0$  приводит к увеличению дальности.

3. Влияние изменения массы ракеты, массы топлива и эффективной скорости истечения газов можно объяснить, анализируя формулу Циолковского для идеальной скорости:

$$V_k = V_0 + W_e \ln \frac{m_0}{m_k} = V_0 + W_e \ln \left( 1 + \frac{m_T}{m_K} \right)$$

Очевидно, что увеличение массы ракеты приведет к уменьшению максимальной скорости, а значит, и к уменьшению дальности полета, а увеличение массы топлива и эффек-

тивной скорости истечения газов приведет к обратному эффекту.

4. Проинтегрировав уравнение

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P-X}{m} - g \sin \theta,$$

получим:

$$V_k = \int dV = \int \frac{P}{m} dt - \int \frac{X}{m} dt - \int g \sin \theta \cdot dt = \Delta V_p - \Delta V_{\text{аэ}} - \Delta V_{\text{грав}}$$

Величина  $\Delta V_p$  представляет собой идеальную скорость движения ракеты, и согласно формуле Циолковского, её значение не зависит от времени работы двигателя, в то время как потери скорости за счет силы лобового сопротивления и силы притяжения возрастут при увеличении времени активного участка, что приведет к уменьшению дальности полета.

5. Одни и те же (в процентном отношении) изменения плотности и коэффициента силы лобового сопротивления приводят к одинаковым отклонениям по дальности, поскольку в выражение для силы лобового сопротивления эти величины входят в одинаковых степенях:

$$X = C_{x\alpha} \rho \frac{V^2}{2} S_M$$

6. Появление ветра на активном участке способствует увеличению угла наклона траектории. А так как в нашем случае  $\theta_0 < \theta_{\text{опт}}$ , это приведет к увеличению дальности полета. Ветер на пассивном участке уменьшает потери скорости, связанные с действием лобового сопротивления, способствует набору скорости за счет силы тяжести, хотя несколько уменьшает горизонтальную составляющую скорости. Дальность при этом также увеличивается.

*Список литературы:*

1. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика, М.: «Машиностроение», 1972. - 584 с.
2. Гудзовский В.А., Межеков В.А., Зотов В.П., Коваленко В.П. Теория полета ракет., – М.: Изд-во Военная Инженерная Орденов Ленина и Суворова Академия им. Ф.Э.Дзержинского, 1966. – 479 с.
3. Наведение и навигация баллистических ракет / Лысенко Л.Н., Изд. МГТУ, 2007. – 658 с.
4. Решение уравнений внешней баллистики на ЭВМ / В.Д. Жилейкин, / Изд. МГТУ – 2007. - 19 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ, КАК СПОСОБ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

КРУГЛОВ Б. В. – старший оператор 3-й научной роты КВ ВКС

ПОЛЛАК А. А. – оператор 3-й научной роты КВ ВКС



Круглов Б. В.



Поллак А. А.

*В статье рассмотрен теоретический метод применения линейного программирования для оптимизации работы отечественного сборного режущего инструмента. Оптимизация режимных параметров на операциях торцевого фрезерования и продольного точения позволяет сравнить технологические возможности режущих инструментов отечественного и иностранного производства и выполнить задачу импортозамещения.*

**Ключевые слова:** торцевое фрезерование, продольное точение, резец, фреза, линейное программирование, импортозамещение, режимы резания, механическая обработка.

## APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING, AS A METHOD OF IMPORT REPLACEMENT OF A CUTTING TOOL

KRUGLOV B.V., POLLAK A.A.

**Annotation.** *The theoretical method of application of linear programming for optimization of work of the domestic combined cutting tool is considered in the article. Optimization of operating parameters on face milling and longitudinal turning operations allows us to compare the technological capabilities of cutting tools of domestic and foreign production and fulfill the task of import substitution.*

**Keywords:** turning, milling, liner programming, import substitutions.

### ВВЕДЕНИЕ

В современной развивающейся России на большинстве предприятий оборонно-промышленного комплекса остро стоит вопрос обеспечения стабильного производства в связи со сложившейся геополитической ситуацией в мире. В частности, напряженная обстановка складывается с инструментальным обеспечением предприятий.

После развала Советского Союза большинство отечественных заводов стали не конкурентоспособными на международной арене, а активная помощь государства на тот момент была невозможна.

Начиная с 1990-х годов многие предприятия ОПК в связи с ликвидацией большинства крупных советских инструментальных заводов вынужденно стали осваивать за-

рубежные рынки, а в связи с этим и переналаживать свое производство на международные стандарты. В частности на стандарт ISO-9001.

В начале 2000-х годов из-за бурного роста экономики России стало активно закупаться современное иностранное оборудование, которое требовало соответствующего стандартам и уровню точности.

В частности на Красногорском механическом заводе достаточная часть станков иностранного производства, а имеющееся советско-российское оборудование также в большинстве случаев комплектуется иностранным инструментом.

В рамках импортозамещения стали появляться новые проекты, для реализации которых необходим современный инструмент высокого качества международного стандарта Российского производства.

После распада СССР и, как следствие, ликвидации или слиянии предприятий ОПК, отечественное производство металлообрабатывающего оборудования и оснастки сократилось с 1990-2005 в 15,14 раз («Итоги интегрированной системы образования в высшей школе России Труды II научно-практической конференции 26-28.10.2011 г. МГИУ»). В связи с этим, предприятиям радиотехнической и машиностроительной отраслей пришлось делать упор на станки и режущий инструмент зарубежного производства и переходить на стандарт ISO-9001. Западные и восточные компании открыли свои представительства в России и принудили производителей пользоваться дорогостоящей техникой, что привело к увеличению цен на конечные продукты, но с всё большим снижением конкурентной способности на рынке.

Главные задачи машиностроения - обеспечение всех отраслей народного хозяйства высокоэффективными машинами и оборудованием; резкое повышение техни-

ческого уровня, качества и конкурентной способности продукции на внешнем рынке и достижение в этой области передовых научно-технических позиций в мире.

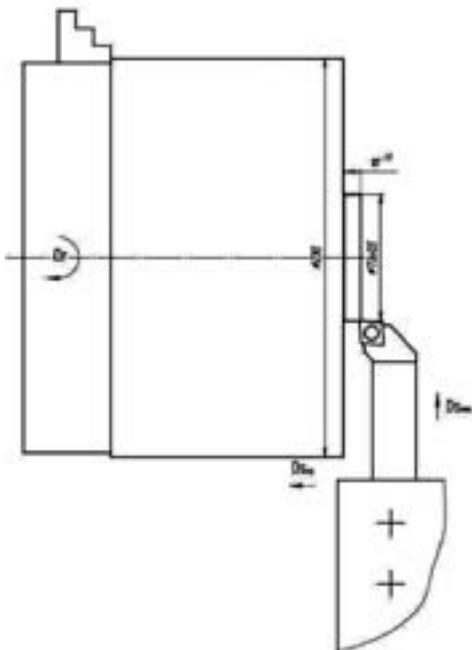
Если речь идет о импортозамещении режущего инструмента, встает вопрос о корректном назначении режимов резания для обработки той или иной детали. В большинстве случаев предприятия-изготовители пренебрегают расчетом данных параметров из-за отсутствия программных продуктов, большой загруженности персонала, а так же возможностью использовать рекомендуемые инструментальным предприятием режимы резания, не делая корректировку на каждый частный случай. Вследствие чего, отечественный инструмент начинает сильно уступать по стойкости и другим техническим характеристикам зарубежных аналогов.

#### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРПУС»

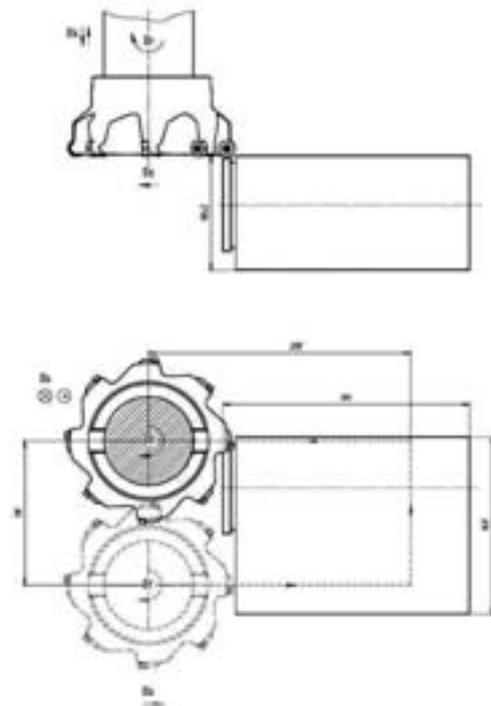
Рассмотрим частный случай изготовления перспективного узла оптического прибора, широко используемого в бронетехнике ВС РФ. Предприятие-изготовитель обратилась за технологической поддержкой в компанию WALTER AG (Германия), которая предлагает свою линейку режущих инструментов, а также софт под названием Walter GPS, позволяющий не только выбрать оснастку, но и рассчитать режимы резания для любого вида механической обработки.

Обзор наиболее трудоемких операций изготовления детали «Корпус» и применение программного продукта для выбора режущего инструмента Walter GPS .

Наиболее трудоемкие операции для изготовления детали «Корпус» характеризуются большим съемом материала и, как следствие, повышенным износом режущего инструмента.



**Рисунок 1.**  
**005. Токарная**



**Рисунок 2.**  
**010. Фрезерная**

**Рисунок 1:**

*Оборудование:* Токарный станок ИЖ-250

*Режущий инструмент:* Резец проходной Walter SCLCR2525M12; Пластина-CCGT120404-PM2 WXN10

*Приспособление:* Трехлапчатый патрон.

*СОЖ:* Эмульсия 5%

*Мерительный инструмент:* Штангенциркуль ШЦК-1-0,02-ГОСТ 166-89, скоба мерительная  $\emptyset$

*Содержание перехода:* Точить  $\emptyset$  на  $L=10$

**Рисунок 2:**

Переход 2.

*Оборудование:* Вертикально-обрабатывающий центр с ЧПУ Hermle C30

*Режущий инструмент:* Фреза торцевая насадная Walter F4080.B40.125DC.Z08.04; Пластина-ODHT0605ZZN-G88 WXN15

*Приспособление:* Поворотный стол, специальный зажимной патрон, комплект прижимных планок.

*Мерительный инструмент:* Штангенциркуль ШЦК-1-0,02-ГОСТ 166-89

*СОЖ:* Эмульсия 5%

*Содержание перехода:* Фрезеровать поверхность  $L \times B \times H=193 \times 140 \times 90$ . Допуск на механическую обработку:  $L \ h14$

Рассмотрим программный продукт Walter GPS. В качестве наиболее трудоемких операций, выбираем процесс торцевого фрезерования и продольного точения:

На первом этапе определяем марку обрабатываемого материала. Выбираем обработку алюминиевых сплавов с твердостью близкой к материалу B95 (HB125).

Марка материала – N3 (HB150)

На втором – вид механической обработки. В данном случае – фрезерование плоскости, а так же задаются параметры обработки и режущего инструмента (рис. 4, рис. 5).

После ввода параметров, программа выводит результат анализа выбора режущего инструмента, после которого инженер может выбрать оптимальный вариант фрезы, исходя из технических и материальных возможностей предприятия (рис.6). В конце приводятся рекомендуемые режимы резания для конкретной операции (рис. 8).

Используемая фреза указана в технологическом переходе торцевого фрезерования.

На рисунке 8 показан общий вид используемой фрезы:

Для операции продольного точения действуем по тому же алгоритму.



Рисунок 3.  
Выбор материала в продукте Walter GPS



Рисунок 4.  
Выбор вида механической обработки



Рисунок 5.  
Задание параметров при торцевой обработке

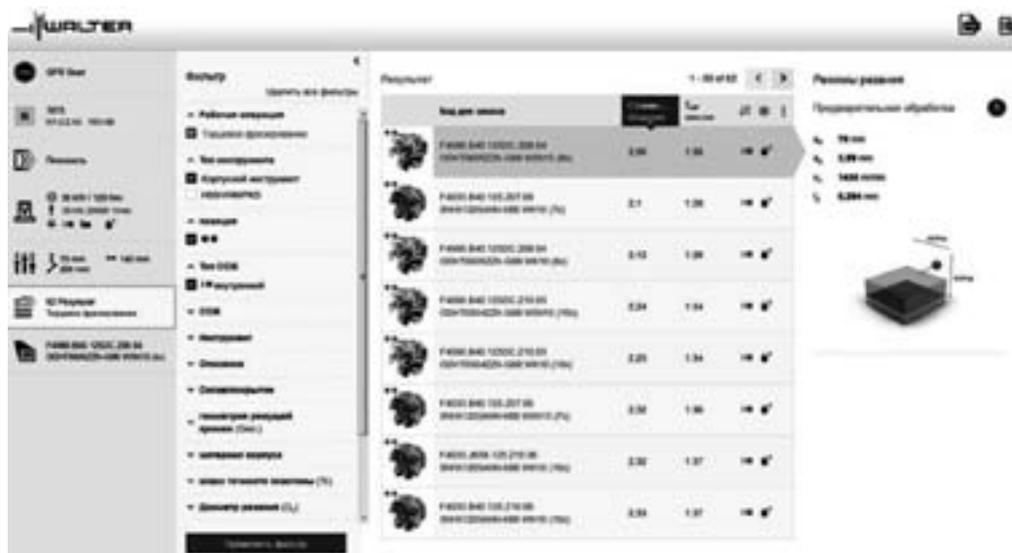


Рисунок 6.  
Подбор наиболее оптимального инструмента

На рисунках 9 и 10 представлены рекомендуемые параметры механической обработки и общий вид токарного проходного резца, маркировка которого указана в технологическом переходе операции продольного точения.

Режимы резания оптимальны для периода стойкости  $T_{st}=45$  мин при фрезеровании и  $T_{st}=15$  мин - точении.

Выбор отечественных аналогов режущих инструментов на операциях торцевого фрезерования и продольного точения.

Хоть и алюминий материал простой в механической обработке, использование инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами (СМП) позволяет сократить вспомогательное время на установку режущего инструмента и его отладку.

Подходящим инструментом для торцевого фрезерования является фреза фирмы ЗАО СКИФ-М, которая специализируется на изготовлении осевого сборного режущего инструмента. Фрезы изготавливаются по международному стандарту ISO1832, что соответствует критериям применяемого оборудования. Исходя из каталога, выбираем фрезу: MT245-160C40R100006. R100006. Пластина: OFCW030302FN-AL.

Токарный резец заказан на предприятии КИЗ – «Киржачский инструментальный завод». Фирма специализируется на изготовлении напайных резцов по ГОСТам, а так же сборных по стандарту ISO1832. Выбираем резец: PCLNR/L 2525 M12. Пластина: CNGA-120408 (05133-120408) B25 (BK6).

#### АНАЛИЗ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Основные понятия и классы задач оптимизации:

1. Должна быть сформулирована целевая функция

$$L = f_0(\bar{x}) = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_0(S, V, t, \dots) \rightarrow \min(\max)$$

или минимизация целевой функции.

Необходимо целевую функцию сформули-

ровать в виде математического выражения.

2. Определить область допустимых значений режимных параметров  $\Omega$ , которая задается системой ограничений в виде соответствующих неравенств или равенств.

$$f_{0n}(\bar{x})=0; f(\bar{x})=0; f_1(\bar{x})\leq 0; f_2(\bar{x})\leq 0; \dots f_o(\bar{x})\leq 0.$$

3. Задача минимизации целевой функции с учетом ограничений называется **математическое программирование**.

**Математическое программирование** – раздел математики, который направлен на решение задач минимизации функции с учетом ограничений.

Если хотя бы одна целевая функция или ограничение представлены в виде нелинейного уравнения, то это задача нелинейного программирования, если линейными – линейного программирования.

Задача линейного программирования не имеет экстремума без граничных условий.

Линейное программирование как метод решения оптимизационных задач

Целевая функция и ограничения представлены линейными уравнениями.

$$L = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \rightarrow \min(\max)$$

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (a_{1,i} \cdot x_i) \leq b_1$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^n (a_{2,i} \cdot x_i) \leq b_2$$

...

$$f_{on} = \sum_{i=1}^n (a_{o+i,i} \cdot x_i) = b_{o+i}$$

$$f_h = \sum_{i=1}^n (a_{n,i} \cdot x_i) = b_h$$

$\Omega$  – область допустимых значений

$L = \text{const}$ ,  $L = \text{const}_2$  – начинаем от какой-то точки, приближаясь к этой области, у которой значения функций константы.

Градиент – вектор самого быстрого увеличения функции

$$\bar{G} = \left( \frac{\partial L}{\partial x_1}, \frac{\partial L}{\partial x_2}, \frac{\partial L}{\partial x_3} \right) = \bar{G}(c_1, c_2, \dots, c_n)$$

$\bar{G}$  – направление наибоыстрейшего увеличения функции.



Рисунок 7.  
Назначенные оптимальные режимы обработки



Рисунок 8.  
Общий вид фрезы



Рисунок 9.  
Общий вид реза



Рисунок 10.  
Рекомендации по режимам резания от компании Walter

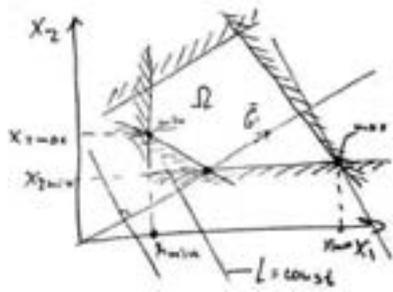
MT245...0006  
Торцевые фрезы 45°

Обозначение	Размеры, мм								Тип фрезы	Материал	Тип реза
	D	n	D1	L	L1	d	d1	Lf			
MT245...0006...0006	40	3,0	40,0	75	40	75	0	17,000	0,2	OCX/DM6	Торцевая фреза
MT245...0006...0008	50	3,0	50,0	95	50	95	0	17,000	0,2		
MT245...0006...0010	63	3,0	63,0	120	63	120	0	17,000	0,2		
MT245...0006...0012	80	3,0	80,0	150	80	150	0	17,000	0,2	OCX/DM6	Торцевая фреза
MT245...0006...0016	100	3,0	100,0	190	100	190	0	17,000	0,2		
MT245...0006...0020	125	3,0	125,0	235	125	235	0	17,000	0,2		
MT245...0006...0025	160	3,0	160,0	300	160	300	0	17,000	0,2	OCX/DM6	Торцевая фреза
MT245...0006...0032	200	3,0	200,0	380	200	380	0	17,000	0,2		

Рисунок 11.  
Выбор фрезы

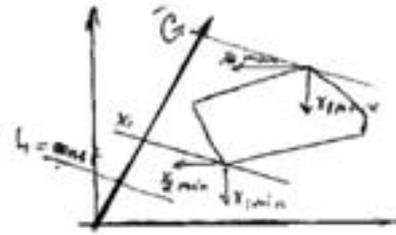
Обозначение реза	Материал обрабатываемого материала	Рекомендуемые режимы резания				Материал реза	Тип реза
		Vc [м/мин]	Fz [мм/зуб]	S [1/мин]	L [мм]		
OCX...0001	OCX...0001	100	0,1	3000	100	OCX...0001	Торцевая фреза
OCX...0002	OCX...0002	100	0,1	3000	100		
OCX...0003	OCX...0003	100	0,1	3000	100	OCX...0001	Торцевая фреза
OCX...0004	OCX...0004	100	0,1	3000	100		
OCX...0005	OCX...0005	100	0,1	3000	100	OCX...0001	Торцевая фреза
OCX...0006	OCX...0006	100	0,1	3000	100		

Рисунок 12.  
Выбор реза



а)

Область существования и ограничения  
положительны



б)

Если ребро совпадает с линией уровня, то получаем  
целый ряд значений, и все они будут оптимальными

Рисунок 13

Последовательность решения задач ЛП (линейного программирования) при оптимизации линейных параметров

1) Сформулировать целевую функцию  $C \rightarrow \min$

$$c = t_0 \cdot E + t_0 \cdot c_{es} + t_0 \cdot \frac{T_{cm} \cdot E + c_u}{T} \rightarrow \min$$

$$c = t_0 \cdot \left( E + c_{es} + \frac{T_{cm} \cdot E + c_u}{T} \right) =$$

$$= \frac{L}{n \cdot S} \cdot \left( E + c_{es} + \frac{T_{cm} \cdot E + c_u}{T} \right) \rightarrow \min$$

$nS \rightarrow \max$  – решение без ограничений не имеет смысла.

$$\ln(nS) \rightarrow \max$$

$$\ln(n \cdot 100S) \rightarrow \max$$

$$\ln(n \cdot 100S) = \ln(n) + \ln(100S) = x_1 + x_2 \rightarrow \max$$

Сделаем замену переменных на  $x_1$  и  $x_2$ , которые функционально связаны.

Определяем ОДЗ для  $x_1$  и  $x_2$ .

Выполнить графическое решение этой задачи. Решив задачу графически, находим  $x_1$  и  $x_2 \max$ , откуда получаем:

$$n_{\max} = e^{x_{1\max}}, [\text{мин}^{-1}]; S_{\max} = \frac{e^{x_{2\max}}}{100}, \left[ \frac{\text{мм}}{\text{об}} \right]$$

Оптимизация режимов резания на операции продольного точения.

$$1) L = x_1 + x_2 \rightarrow \max$$

$$2) \text{ Определяем ОДЗ: } x_1 + x_2 \rightarrow \Omega$$

а) Ограничения по допустимой скорости резания или стойкости.

$$V = \frac{C_V \cdot K_V}{T^{m_V} \cdot t^{x_V} \cdot S^{y_V} \cdot 60}$$

$$\frac{\pi d n}{6 \cdot 10^4} \leq \frac{C_V \cdot K_V \cdot 100^{y_V}}{T^{m_V} \cdot t^{x_V} \cdot (100 \cdot S)^{y_V} \cdot 60}$$

$$(100 \cdot S)^{y_V} \cdot n \leq \frac{6 \cdot 10^4 \cdot C_V \cdot K_V \cdot 100^{y_V}}{\pi d \cdot T^{m_V} \cdot t^{x_V} \cdot 60}$$

$$x_1 + y_V \cdot x_2 \leq \ln \left( \frac{6 \cdot 10^4 \cdot C_V \cdot K_V \cdot 100^{y_V}}{\pi d \cdot T^{m_V} \cdot t^{x_V} \cdot 60} \right) = b_1$$

$$x_1 + y_V \cdot x_2 \leq b_1$$

б) По мощности привода главного движения станка.

$$\frac{P_z \cdot V \cdot K_W}{1000 \cdot \eta_{st}} \leq N_{st}$$

$K_W$  – коэффициент, учитывающий потери электроэнергии ( $K_W=1,2$ )

$\eta_{st}$  – КПД станка ( $\eta_{st}=0,8$ )

$$\frac{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot K_p \cdot V \cdot K_W}{(V \cdot 60)^{n_p} \cdot 1000 \cdot \eta_{st}} \leq N_{st}$$

$$n^{1-n_p} \cdot (100 \cdot S)^{y_p} \leq \frac{N_{st} \cdot 10^{6-3n_p+2y_p} \cdot \eta_{st}}{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot (\pi \cdot d)^{1-n_p} \cdot K_W}$$

$$(1-n_p)x_1 + y_p \cdot x_2 \leq \ln \left( \frac{N_{st} \cdot 10^{6-3n_p+2y_p} \cdot \eta_{st}}{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p \cdot (\pi \cdot d)^{1-n_p} \cdot K_W} \right) = b_2$$

$$(1-n_p)x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_2$$

в) По производительности обработки  $Q(n, S) \geq Q_z$  – заданная производительность обработки.

$$t_{um} = t_o \cdot \left[ (1 + \varepsilon) \cdot \left( 1 + \frac{a_{обс}}{100} \right) + \frac{T_{cm}}{T} \right] =$$

$$= \frac{L}{n \cdot S} \cdot \left[ (1 + \varepsilon) \cdot \left( 1 + \frac{a_{обс}}{100} \right) + \frac{T_{cm}}{T} \right] = \frac{C_t}{n \cdot S}$$

$$\frac{n \cdot 100S}{C_t} \geq Q_z$$

$$n \cdot 100S \geq Q_z \cdot C_t$$

$$x_1 + x_2 \geq \ln(Q_z \cdot C_t) = b_3$$

$$x_1 + x_2 \geq b_3$$

г) По шероховатости

$$C_R \frac{S^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} \cdot V^{k_3}} = R_{az}$$

r – радиус при вершине резца

V – [м/с]

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{6 \cdot 10^4}$$

$$\frac{(100 \cdot S)^{k_1}}{n^{k_3}} \leq \frac{R_{az} \cdot (\pi \cdot d)^{k_3} \cdot 100^{k_1} \cdot r^{k_2}}{(6 \cdot 10^4)^{k_3} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}}$$

$$-k_3 \cdot \ln(n) + k_1 \cdot \ln(100 \cdot S) \leq \ln \left( \frac{R_{az} \cdot (\pi \cdot d)^{k_3} \cdot 100^{k_1} \cdot r^{k_2}}{(6 \cdot 10^4)^{k_3} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}} \right) = b_4$$

$$-k_3 \cdot x_1 + k_1 \cdot x_2 \leq b_4$$

5) По допустимым пределам частоты вращения шпинделя (из паспортных данных)

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$$

$$\ln(n_{\min}) \leq x_1 \leq \ln(n_{\max})$$

$$b_6 \leq x_1 \leq b_5$$

6) По предельным значениям подачи

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$$

$$\ln(S_{\min}) \leq x_2 \leq \ln(S_{\max})$$

$$b_8 \leq x_2 \leq b_7$$

7) По жесткости резца

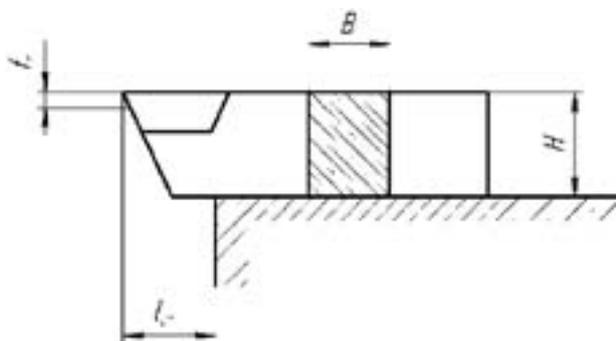


Рисунок 14

$$\frac{P_z}{j_r} \leq f_r$$

$j_r$  – жесткость резца [Н/мм], [Н/мм]

$$j_r = \frac{3EI}{l_{vr}^3}$$

Рекомендуемое значение вылета резца: .

$E = 2,2 \cdot 10^5$  МПа – модуль Юнга

$$I = \frac{BH^3}{12} \text{ – момент инерции}$$

$$\frac{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot K_p}{(V \cdot 60)^{n_p} \cdot j_r} \leq f_r$$

где выбирается из следующей таблицы

Таблица 1.

Выбор экстремальной толщины резца

Вид обработки	$f_r$
Получистовое точение	0,1
Чистовое точение	0,05
Тонкое точение	0,01

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{6 \cdot 10^4}$$

$$\frac{(100S)^{y_p}}{n^{n_p}} \leq \frac{(\pi \cdot d)^{n_p} \cdot 3E \cdot B \cdot H^3 \cdot f_r \cdot 100^{y_p}}{9.81 \cdot 12 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot (10^3)^{n_p} \cdot K_p \cdot (1.5H)^3}$$

$$-n_p \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq \ln \left( \frac{(\pi \cdot d \cdot 10^3)^{n_p} \cdot E \cdot B \cdot f_r \cdot 100^{y_p}}{132.451 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p} \right) = b_9$$

$$-n_p \cdot x_1 + y_p \cdot x_2 \leq b_9$$

8) По точности обработки

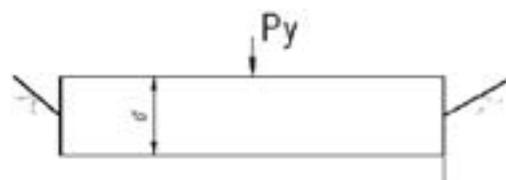


Рисунок 15

$$\frac{P_y}{j_d} \leq f_y$$

$j_d$  – жесткость детали

$$j_d = \frac{3 \cdot \pi d^4 \cdot E}{4 \cdot l^3}$$

$f_y = 0.5 \cdot \delta$ , где  $\delta$  – допуск на размер

$$\frac{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_{py}} \cdot S^{y_{py}} \cdot K_{py}}{(V \cdot 60)^{n_{py}} \cdot j_d} \leq f_y$$

$$-n_{py} \cdot x_1 + y_{py} \cdot x_2 \leq b_{10}$$

9) Решать задачу графически.

Находим  $x_{1\max}$  и  $x_{2\max}$ , откуда находим  $n_{\max}^*$ ,  $S_{\max}^*$  – оптимальные значения.

Оптимизация режимов резания на операции торцевого фрезерования.

Структура постановки задачи совпадает с продольным точением, но зависимости имеют следующий вид:

$$V = \frac{\tilde{N}_V \cdot d^{q_v} \cdot K_V}{T^{m_v} \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v} \cdot 60} \cdot \left[ \frac{i}{n} \right]$$

$$P_z = \frac{9.81 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z^{p_p} \cdot K_p}{d^{q_p} \cdot n^{w_p}} \cdot [H]$$

Решение оптимизационной задачи на операции продольного точения.

Используя структуру и зависимости, описанные в п. 3.1-3.2, занесем данные в программный продукт Microsoft Excel. С его по-

мощью можно математически и графически решить поставленную задачу:

Составляем таблицу 2, заносим следующие данные:

$d$  – обрабатываемый диаметр, мм

$l$  – длина обработки, мм

$t$  – глубина резания, мм

$S$  – подача, мм/об

$T$  – стойкость инструмента, мин

$Ra$  – шероховатость поверхности, мкм

Значения коэффициентов берем из справочника «?». Крутящий момент и мощность станка – из паспорта оборудования.

Используя зависимости, вводим формулы и получаем следующий результат (рис. 16).

Оптимальными режимами обработки будет считаться точка пересечения ограничений по скорости резания и шероховатости поверхности.

Получаем точку:

$$X=5,884396994; V=2,2155054$$

Исходя из пересечения, найдем оптимальные режимы работы резца:

$$n = \exp(x) = 285 \text{ об/мин};$$

$$V = \frac{\pi d \exp(x)}{1000}; V = 206 \text{ м/мин}$$

$$S = \exp(y) = 0,4 \text{ мм/о}$$

Решение оптимизационной задачи на операции торцевого фрезерования.

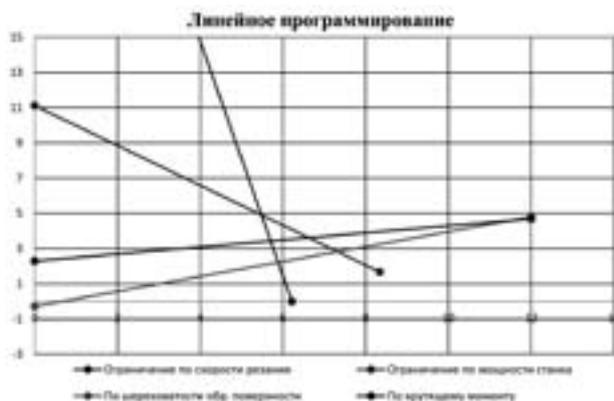
Данную задачу можно решить в программ-

Таблица 2

OM	B95	C''v	240
ИМ	BK6	C'''v	150
$d$	230	$C_p$	3400
$l$	10	$m_v$	0,25
$t$	2	$x_v$	0,45
$S$	0,3	$y_v$	0,15
$T$	30	$x_p$	0,95
$Ra$	5	$y_p$	0,75
$\sigma_{\sigma}$	600	$n_p$	0,15
$C_v$	580	$Nst$	11
$C'v$	360	$M$	140

Таблица 3

$L$	200	$y_v$	0,35
$t$	70	$u_v$	0,2
$z$	8	$p_v$	0
$Ra$	5	$m_v$	0,3
$T$	120	$K_v$	0,86
$B$	70	$K_w$	1
$Nst$	10	$Mst$	87
$f_i$	75	$nst$	0,8



**Рисунок 16.**  
**Графическое решение задачи**

ном продукте Mathcad. Результаты линейного программирования приведены в приложении №1.

Из графика видно, что целевая функция достигается в точке пересечения ограничения по скорости и ограничения по моменту

Результаты графического анализа в таблице 3. Ввод параметров фрезы.

$$n=282 \text{ об/мин}$$

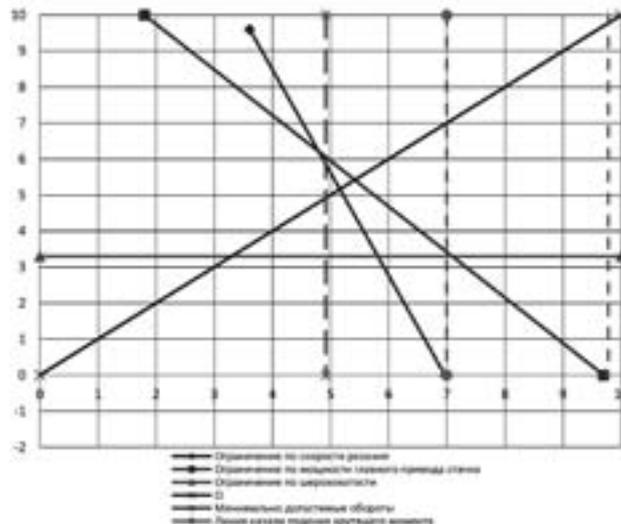
$$V=110 \text{ м/мин}$$

$$S_z=0,27 \text{ мм/зуб}$$

$$S=z \times S_z=2,16 \text{ мм/об}$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод линейного программирования позволяет рассчитать режимы резания по техническим характеристикам станка и требованиям к качеству обрабатываемой поверхности, а применение методики к отечественным инструментам дает возможность выбрать оптимальные параметры механической обработки, учитывая все технологические особенности, что позволяет сравнить с ино-



**Рисунок 17.**

странными аналогами и при целесообразности произвести их импортозамещение.

#### Список литературы:

1. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. Справочник. Я.Л.Гуревич и др. М. Машиностроение. 1976 и 1986г.
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 728 с., ил.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова – 4-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Курс лекций « Оптимизация механической обработки» МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра МТ-2. Авторы: С. В. Грубый. 2011г.
5. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов. Справочник под ред. В.И. Баранчикова-М.: Машиностроение 1990 с ЧАО.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ ЧЕРЕЗ МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ ИНТЕРФЕЙС HDMI ПО КАНАЛУ ПЭМИН

БУЕВ Д.С. – лейтенант, инженер-испытатель



Бувев Д.С.

*Современный этап развития российского общества характеризуется существенным возрастанием понимания роли и актуальности проблем обеспечения безопасности во всех сферах жизнедеятельности. На данный момент при использовании видео и аудио аппаратуры широкое распространение получил мультимедиа интерфейс HDMI. Поэтому возникает вопрос о возможности утечки информации по каналу ПЭМИН, передаваемой с его помощью.*

**Ключевые слова:** информационная безопасность, мультимедиа, интерфейс HDMI.

### INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF INFORMATION LEAKAGE THROUGH THE MULTIMEDIA HDMI INTERFACE VIA THE TEMPEST CHANNEL

BUYEV D.S.

**Annotation.** *The current stage of development of Russian society is characterized by a significant increase in understanding the role and relevance of the security issues in all spheres of life. At the moment, with the use of video and audio equipment, the HDMI multimedia interface is widely used. Therefore, there is a question about the possibility of information leakage through the TEMPEST channel, through which the information is transmitted.*

**Keywords:** Information Security, multimedia, TEMPEST HDMI.

HDMI – интерфейс для мультимедиа высокой чёткости, позволяющий передавать цифровые видеоданные высокого разрешения и многоканальные цифровые аудио сигналы. Разъем HDMI меньше по размеру его аналога DVI, а так же поддерживает передачу многоканальных цифровых аудио сигналов, так же является заменой аналоговых стандартов подключения. Так же данный интерфейс позволяет пользователю контролировать до 15 устройств связанные через HDMI, используя только один из своих пультов дистанционно-

го управления и даже объединить все устройства в локальную сеть типа Ethernet, вплоть до возможности выхода в интернет.

На рис. 1 приведена схема передачи видео и аудио данных с использованием HDMI кабеля.

Для передачи мультимедиа информации каждому каналу к источнику поступает в параллельном виде 8 бит данных. Далее они проходят процедуру кодирования для передачи по интерфейсу HDMI, в результате которого данные принимают вид 10 битовой

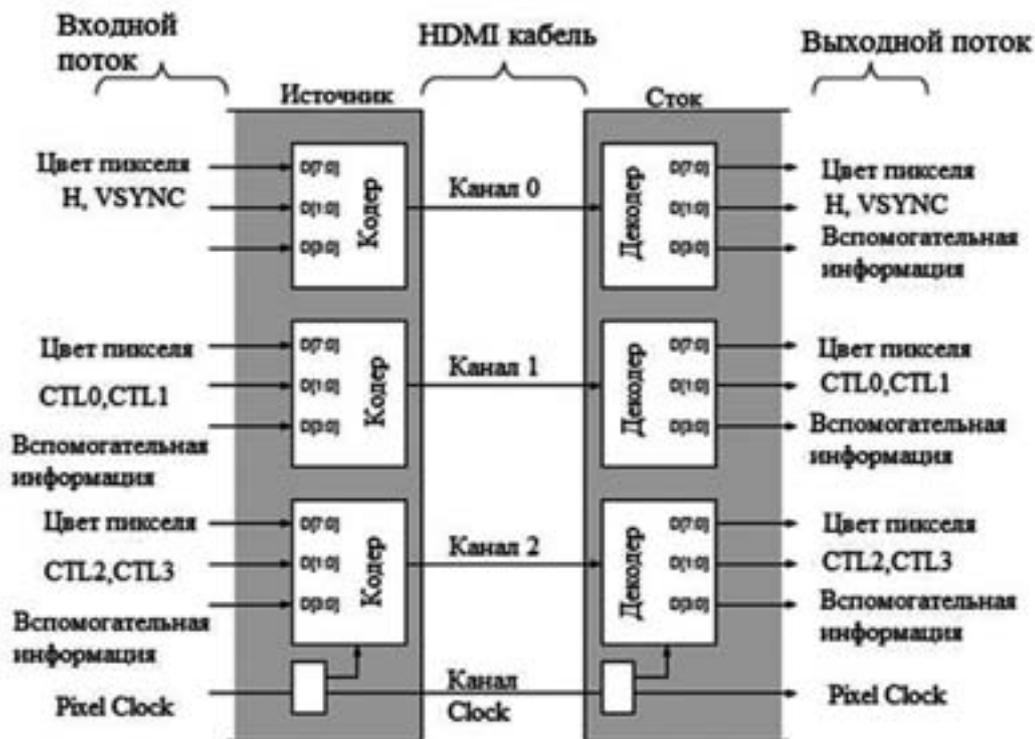


Рисунок 1.

Каналы передачи видео и аудио данных

последовательности. В стоке происходит процедура декодирования, в которой данные снова принимают параллельный вид. Преобразование в последовательный сигнал необходимо для передачи по кабелю, так как он более устойчив к помехам, особенно на дальние расстояния.

Кодирование 8B10 проходит в два этапа. На первом этапе производится минимизация количества переходов в принятой последовательности из восьми бит. В зависимости от количества в ней положительных импульсов, над последовательностью производится преобразования XOR или XNOR. К последовательности добавляется девятый бит, отражающий вид проведенного преобразования.

На втором этапе алгоритм устанавливает баланс между нулевыми и единичными импульсами. В зависимости от предыдущих последовательностей может производиться инверсия значимых битов. К последовательности добавляется десятый бит, отражающий результат преобразования.

Таким образом, при исследовании ПЭМИ от HDMI интерфейса подключенного к экрану необходимо понимать какими последова-

тельностью обозначаются цвета пикселей монитора, а следовательно какой вид они примут после кодирования 8B10B.

Для примера была рассмотрена работа монитора подключенного через HDMI кабель к видео карте персонального компьютера. Разрешение экрана 1280x1080p 60Hz, глубина цвета 24 RGB full range. Для поиска частот излучения был разработан тестовый сигнал: заливка экрана цветом RGB (33,33,33). Для выбранного режима работы интенсивность цвета 33 после преобразования 8B10B будет иметь кодировку, представленную в табл. №1

При работе тестового сигнала, во время передачи видеoinформации по трем каналам будут передаваться последовательности, представленные на рис. 2:

Рисунок 2 Результаты кодирования последовательности 00100001 (33)

При проведении опыта с использованием SDR-приемника было обнаружено излучение на частотах представленных в таблице 2:

Таблица 2. Результаты эксперимента.

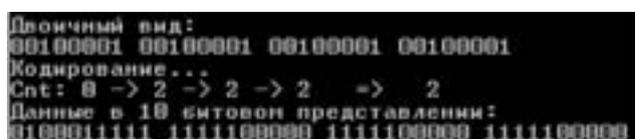
При наблюдении за излучением на какой-либо из установленных частот опытным пу-

**Таблица 1.**  
**Преобразования цвета 33**

№ п/п	Параметр cnt	10 битовая последовательность
1	-8	0100011111
2	-6	0100011111
3	-4	0100011111
4	-2	0100011111
5	0	0100011111
6	2	1111100000
7	4	1111100000
8	6	1111100000
9	8	1111100000

**Таблица 2.**  
**Результаты эксперимента**

Частота f, МГц	Ус+ш, Дб	Уш, Дб
108	-39,95	-65
216	-43,61	-65
324	-25,68	-65
432	-34,65	-67
540	-27,72	-67
648	-33,42	-65
756	-33,83	-70
864	-41,58	-65
972	-34,28	-70
1404	-39,95	-62

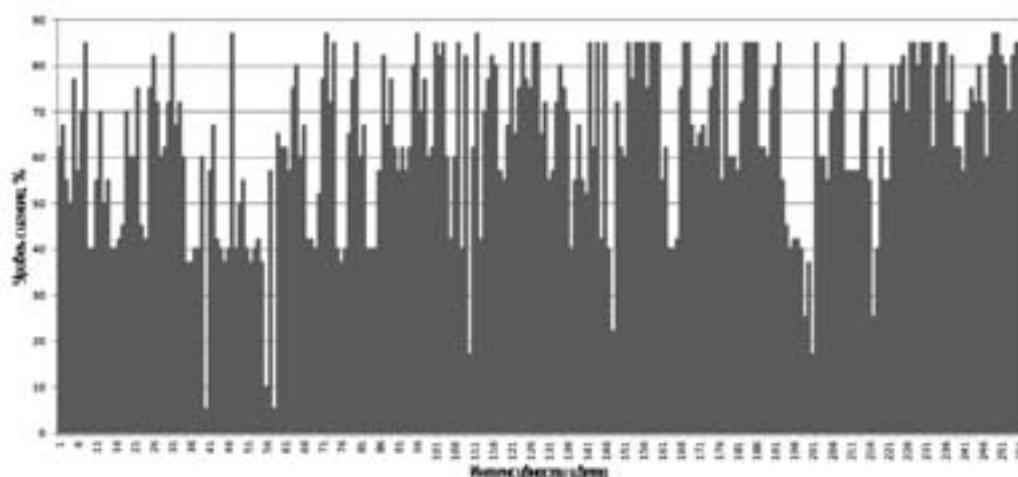


**Рисунок 2.**  
**Результаты кодирования**  
**последовательности 00100001 (33)**

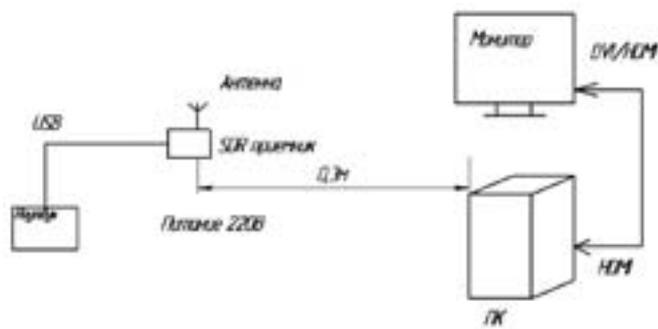
тем была обнаружена зависимость мощности излучения от подаваемой на экран монитора информации. На экран выводились картинки, которые были закрашены оттенками серого цвета. То есть в первой все пиксели принимали значение RGB (0,0,0) – черный цвет,

во второй RGB (1,1,1) и так далее до RGB (255,255,255) – белый цвет. Уровень излучения фиксировался и наблюдался, как резкий провал уровня сигнала при выводе на экран некоторых цветов, так и сильный подъем. На рис. 3 приведены полученные данные.

Таким образом, уровень излучения от HDMI изменяется при выводе на экран монитора различных цветов. Причем существуют такие комбинации цветов, от которых создают заметный перепад в уровне излучения. При подробном рассмотрении данного факта выяснилось, что возможно создание цветных картин, которые будут немного отличаться



**Рисунок 3.**  
**Зависимость уровня излучения от цвета подаваемого на экран**



**Рисунок 4.**

**Схема измерительной установки**

яркостью изображения, но для человеческого глаза они будут практически одинаковыми. В то же время при выводе данной информации на экран, ПЭМИ будет ощутимо контрастным.

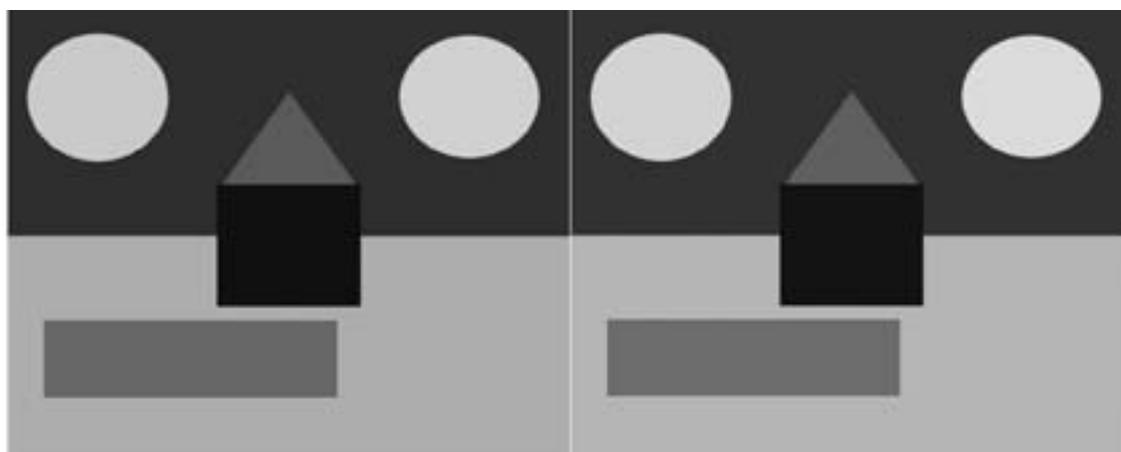
Для подтверждения данной теории был произведен опыт по приему излучения, формирующегося в ходе работы HDMI интерфейса, и вывода на экран двух тестируемых изображений.

В опыте использовались: персональный компьютер, монитор, HDMI-DVI/HDMI, SDR-приемник, ноутбук. На было ноутбуке установлено специализированное ПО и подключен SDR-приемник. Далее приемник был настроен на частоту 324 МГц. А на монитор были подано 2 изображения (см рис. 5), в одном из них были использованы палитра цветов, уровни интенсивностей которых соответствовала низкому уровню излучения, согласно результатам предыдущих опытов, а другая наоборот – высокому.

В итоге изображения получились практически одинаковыми, и неразличимыми для человеческого глаза. Однако левый рисунок сделан из комбинаций уровней интенсивности 26 и 227, а правый 22 и 219. Эти изображения в ходе опыта выводились на экран по очереди и сменялись друг другом через несколько секунд. SDR-приемник фиксировал следующую картину показанную на рис. 6.

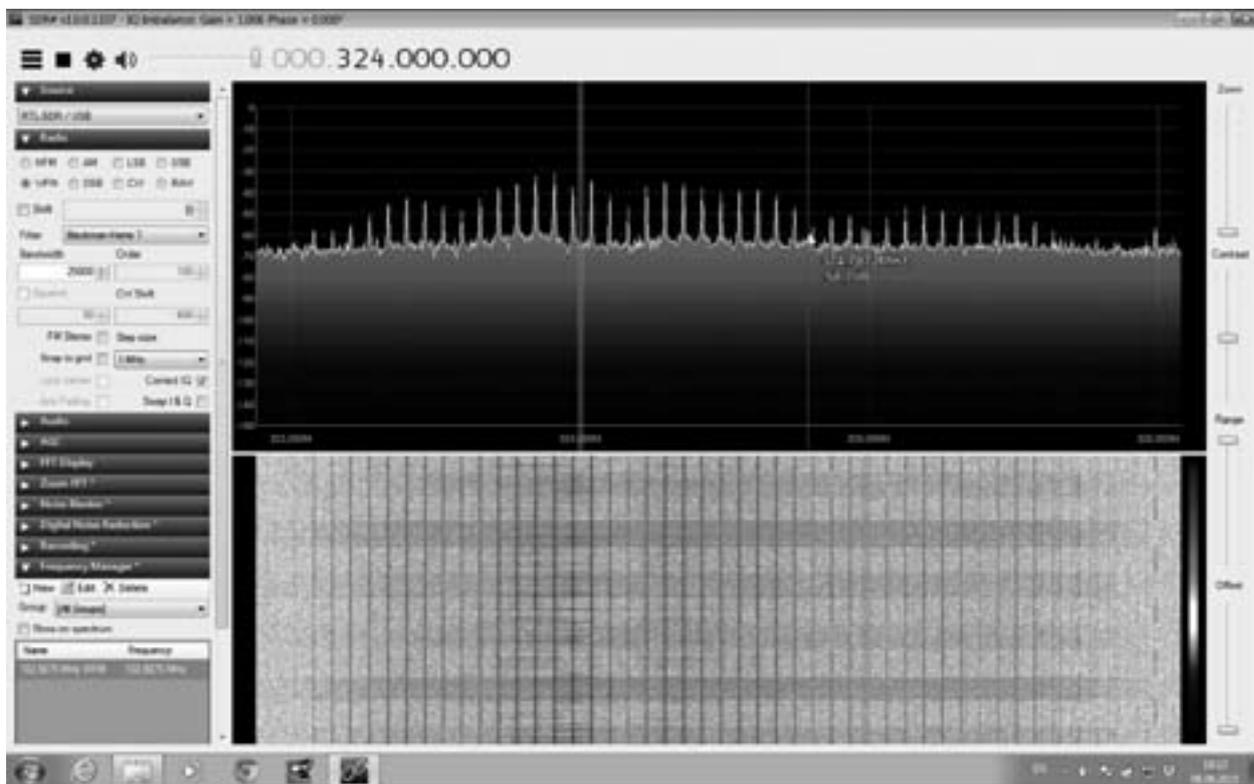
Как видно на рисунке 6, SDR-приемник регистрирует контрастные уровни излучения, при работе тестового сигнала. Разница в уровне принимаемого сигнала в среднем составляла 10Дб. При удалении на 5 метров уровень сигнала падал на несколько Дб, но перепады были так же хорошо различимы. При удалении из помещения между принимающей антенной и HDMI кабелем было приблизительно 10 метров и бетонное перекрытие, но все так же можно было зафиксировать изменение уровня сигнала ПЭМИ соответствующее чередованию изображений на экране.

Проведение данного эксперимента подтверждает возможность формирования скрытого, программно-формируемого канала утечки информации. Он подразумевает собой внедрение вредоносной программы, способной найти на ПК защищаемую информацию, и для ее передачи она должна будет менять цветовые характеристики изображений, выводимых пользователем на экран монитора так, чтобы он ничего не заподозрил.



**Рисунок 5.**

**Тестовые изображения**



**Рисунок 6.**

*Сонограмма полученная в результате чередования тестовых изображений*

Данный опыт осуществлялся с использованием любительского SDR-приемника, можно с уверенностью сказать что применяя целевую аппаратуру можно увеличить качество и дальность приема.

При детальном анализе битовых последовательностей так же возможно составление

гаммы цветов, использование которых сможет снизить уровни ПЭМИ, а это в свою очередь уменьшит зону распространения излучения. Данная процедура позволит уменьшить отношение величин сигнала и шума на границе КЗ и электромагнитную обстановку за рабочим местом.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

РОДИОНОВ А.Д. – старший оператор 3-й научной роты КВ ВКС

КРУГЛОВ Б.В. – старший оператор 3-й научной роты КВ ВКС



Родионов А.Д.



Круглов Б.В.

*В статье рассматриваются возможные способы построения лидаров, раскрывается их предназначение и описываются все составляющие разработанного лидара. Также приводится энергетический расчет с использованием существующих на данный момент компонентов оптической схемы лидара, представляющий собой алгоритм действий для расчета дальности работы лидара в зависимости от различных требований.*

**Ключевые слова:** лидар, энергетический расчет, моностатический, биаксиальный.

### ENERGY COMPUTATION OF THE LIDAR THAT MEASURES SPEED AND WIND DIRECTION

RODIONOV A.D., KRUGLOV B.V.

**Annotation.** *The article considers possible ways of building lidars, reveals their purpose and describes all the components of the developed lidar. Also, energy computation is performed using the currently existing components of the lidar optical circuit, which is an algorithm for calculating the range of the lidar, depending on various requirements.*

**Keywords:** lidar, energy, monostatic, biaxial.

#### ВВЕДЕНИЕ

Для получения данных о ветре в местах, недоступных для установки датчиков, а также усредненных по массе, площади и объему, необходимо использовать лидары. Это слово является транслитерацией от английского lidar – light identification, detection and ranging (оптическая идентификация, обнаружение и локация). Лазерная локация скорости ве-

тра использует перемещение увлекаемых им естественных рассеивателей оптической энергии (аэрозолей, молекул).

Скорость и направление движения воздушных масс (ветер) необходимо знать для многих практических приложений: прогноза климата, охраны окружающей среды, при ликвидации последствий катастроф и чрезвычайных ситуаций, для обслуживания полетов летательных аппаратов и др.

Лидарные системы подразделяются по своей компоновке на бистатические (излучатель и приемник расположены на противоположных сторонах исследуемого объекта) и моностатические. Разработанный лидар является моностатическим, т.е. он полностью расположен в одном месте базирования (борт вертолета или самолета, космический корабль).

Для возвращения излучения используются различные оптические процессы, происходящие в самом исследуемом объекте. В этом случае появляется возможность не только определить состав примесей в атмосфере, но и по задержке отраженного светового импульса относительно исходного лазерного импульса найти расстояние до объекта.

Лидарные системы также подразделяются по типам передающей и/или приемной части на моноаксиальные (объектив телескопа работает как передающая и приемная системы одновременно) и биаксиальные. У разработанного биаксиального лидара данные системы разделены, а расстояние между осями этих систем является его базой.

Данный лидар состоит из трех основных частей: передающей и приемной систем, системы управления.

Передающая система лидара состоит из лазера и оптической системы. Мощный лазерный импульс разделяется передающей оптической системой на два пучка и направляется на место измерения.

Передающая часть должна в основном решать три задачи: улучшать коллимацию светового потока, осуществлять пространственную фильтрацию пучка и отсекалть любое нежелательное излучение, включая побочное излучение лазера.

Приемная часть состоит из следующих элементов:

- телескопическая система, используется для получения обратно-рассеянного излучения;
- светофильтр, используется для уменьшения пропускания нежелательного излучения;
- фокусирующая линза, необходима для фокусировки излучения на диафрагму;
- диафрагма, используется для пространственного разделения пучков лучей, падающих под маленькими углами;
- светоделительная призма, используется для отражения излучения на фотоэлектронные умножители;
- фотоэлектронные умножители (ФЭУ), используются для приема излучения.

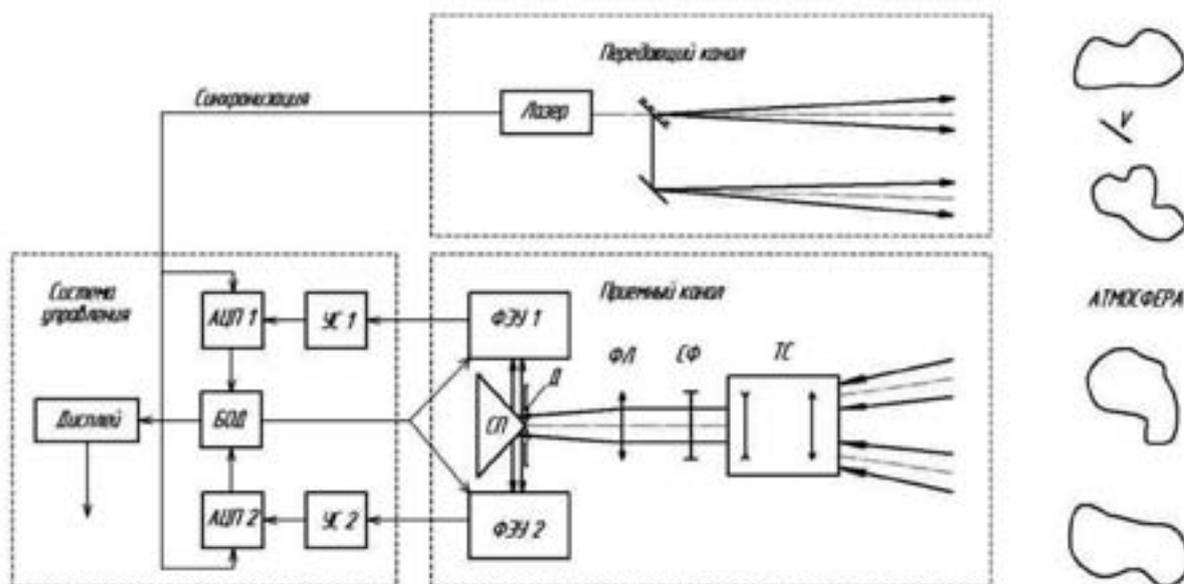


Рисунок 1.

Структурная схема разрабатываемого лидара, где: ТС – приемная телескопическая система, СФ – светофильтр, ФЛ – фокусирующая линза, Д – диафрагма, СП – светоделительная призма, ФЭУ1, ФЭУ2 – фотоэлектронные умножители, УС1, УС2 – усилители, АЦП1, АЦП2 – аналогово-цифровые преобразователи, БЛОК – блок обработки данных

Система управления состоит из усилителей, необходимых для увеличения сигнала с ФЭУ; аналогово-цифрового преобразователя, который через блок синхронизации синхронизируется с лазером и, получая сигнал от ФЭУ, преобразует информацию, после чего подает ее в блок обработки данных.

Используя информацию, полученную с АЦП 1 и АЦП 2, программа на компьютере производит необходимые вычисления и предоставляет пользователю информацию о скорости и направлении ветра посредством дисплея.

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРИЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Основной целью энергетического расчета является нахождения оптимального соотношения между диаметром объектива приемной системы и предельной дальностью работы лидара.

Зависимость мощности излучения от расстояния описывается следующим уравнением:

$$P(z) = P_0 \cdot b \cdot \beta \cdot T(z)^2 \cdot \frac{A(z)}{z^2}, \quad (1)$$

где  $P(z)$  – мощность излучения;  $P_0$  – импульсная мощность лазера;  $b$  – лидарное отношение;  $\beta$  – коэффициент объемного рассеяния;  $T(z)$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $z$  – расстояние.

Коэффициент пропускания атмосферы задается выражением:

$$T(z) = \exp \left[ - \int_0^z (\xi) dz \right], \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент ослабления.

Уравнение оптической локации имеет вид:

$$A(z) = K_s \cdot K_{opt} \cdot \pi \cdot r_p^2 \left( \frac{\alpha_p^2}{\alpha_u^2 + \alpha_p^2} \right)$$

$$\left( \frac{c \cdot \tau_u}{2} \right) \exp \left( \frac{-(\xi_0)^2}{(\alpha_u^2 + \alpha_p^2) \cdot z^2} \right) \quad (3)$$

где  $K_s$  – коэффициент пропускания оптики передающего канала;  $K_{opt}$  – коэффициент пропускания оптики приемного канала;  $r_p$  – радиус приемного объектива;  $\alpha_u$  – половинный угол поля зрения измерительного канала;  $\alpha_p$  – половинный угол поля зрения приемной системы;  $c$  – скорость света;  $\tau_u$  – длительность импульса излучения;  $\xi_0$  – база.

В качестве источника излучения был выбран лазер Expla NL231-50.

Длина излучения лазера равна  $\lambda = 355$  нм. При данном энергетическом расчете метеорологическая дальность видимости берется равной  $Sm = 10$  км.

Коэффициент ослабления определяется следующим выражением:

$$\xi = 10^{-3} \left( \frac{3,91}{Sm} \right) \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0,585 \sqrt{Sm}} = 6,788 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (4)$$

где  $\lambda_0$  – эталонная длина волны,  $\lambda_0 = 550$  нм.

Коэффициент объемного рассеяния находится из выражения:

$$\beta = 10^{-4} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0,8} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (5)$$

Расстояние между оптическими осями лазера и приемной системы называется базой и задается исходя из геометрических соображений,  $\xi_0 = 0,25$  м.

Радиус приемного объектива определяет радиус первого компонента приемной системы:

$$r_p = \frac{D \cdot 0,9}{2} = \frac{0,09 \cdot 0,9}{2} = 0,0405 \text{ м}, \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр входной линзы, подбирается методом проб. Необходимо доказать что система будет обеспечивать дальность действия не менее 1 км при данном диаметре линзы.

Коэффициент пропускания (отражения) оптики передающего канала обуславливает потери излучения на зеркалах. Для данного лидара были выбраны зеркала фирмы Thorlabs, inc. (полупрозрачное зеркало – BSW20, отражающее зеркало – NB1-J07). Так как рассчитываем энергию для одного измерительного канала, получим:

$$K_s = 2 \cdot K_{m1} = 2 \cdot 0,495 = 0,99, \quad (7)$$

где  $K_{m1}$  – коэффициент пропускания (отражения) полупрозрачного зеркала.

Коэффициент пропускания (отражения) оптики приемного канала определяется как произведение коэффициентов пропускания (отражения) всех оптических элементов канала. Линзы и призма изготавливаются на ЛЗОС, светофильтр используется LL01-355-25, компании Semrock.

Коэффициент пропускания (отражения) каждой линзы будет равен  $K_{l1}=K_{l2}=K_{l3}=0,96$ ; светофильтра  $K_{sf}=0,8$ ; призмы  $K_{pr}=0,99$

$$K_{opt}=K_{l1} \cdot K_{l2} \cdot K_{sf} \cdot K_{l3} \cdot K_{pr}=0,96^3 \cdot 0,8 \cdot 0,99=0,7 \quad (8)$$

Длительность импульса излучения является одной из характеристик лазера и равна  $\tau_u=6 \cdot 10^{-9}$  с.

Импульсная мощность лазера также берется из характеристик лазера, но дальнейшие расчеты будут проводиться для одного из измерительных каналов, следовательно, мощность будет в два раза меньше паспортной.

$$P_0 = \frac{P_{\text{лаз}}}{2 \cdot \tau_u} = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-9}} = 2,92 \cdot 10^6 \text{ Вт} \quad (9)$$

где  $P_{\text{лаз}}$  – импульсная мощность лазера.

Лидарное отношение задается выражением [4]:  $b=0,1882$

Половинный угол поля зрения измерительного канала равен половине угла расходимости лазера  $\alpha_u=0,4 \cdot 10^{-3}$  рад. Половинный угол поля зрения приемного системы для одного измерительного канала  $\alpha_p=1 \cdot 10^{-3}$  рад.

Используя данные значения, получаем зависимость мощности принимаемого излучения от расстояния до лидара.

#### РАСЧЕТ ФОНОВОЙ ЗАСВЕТКИ

Необходимо рассчитать яркость фонового излучения и определиться с тем, в каких условиях может работать проектируемый лидар. Спектральная яркость фонового излу-

чения (в приближении однократного рассеяния), приходящего на приемник, находится из выражения:

$$L_\lambda(\theta_0, \phi) = \frac{1}{4} \cdot \lambda_s \cdot S_\lambda \cdot 10^4 \cdot \chi(\theta_0, \phi) \cdot \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta) - \cos(\theta_0)} \cdot \exp(\theta_0) \quad (10)$$

где  $\lambda_s$  – отношение показателя рассеяния земной атмосферы к показателю рассеяния,  $\lambda_s=1$ ;  $S_\lambda$  – спектральная солнечная постоянная;  $\chi$  – индикатриса рассеяния;  $\theta$  – зенитный угол;  $\theta_0$  – угол трассы зондирования;  $\phi$  – азимут Солнца.

Спектральная солнечная постоянная на длине волны 0,355 мкм описывается выражением  $S_\lambda = \frac{0,116 \text{ Вт}}{\pi \text{ см}^2 \cdot \text{мкм}}$ .

Горизонтальной трассе зондирования соответствует угол  $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ .

С помощью следующих уравнений получим зависимости значений фоновой засветки от зенитного угла:

$$\gamma(\theta_0, \phi) = \arccos(\cos(\theta) \cdot \cos(\theta_0) + \sin(\theta) \cdot \sin(\theta_0) \cdot \cos(\phi)) \quad (11)$$

$$\chi(\theta_0, \phi) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cdot \cos(\gamma(\theta_0, \phi)))^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

где  $g$  – коэффициент, значение которого в условиях атмосферной дымки варьируется 0,2..1. Наиболее вероятным будет значение  $g=0,5$ .

$$\exp(\theta_0) = \left[ \exp\left[\frac{-(\tau_0 - \tau)}{\cos(\theta)}\right] - \exp\left[\frac{-(\tau_0 - \tau)}{\cos(\theta_0)}\right] \right] \quad (13)$$

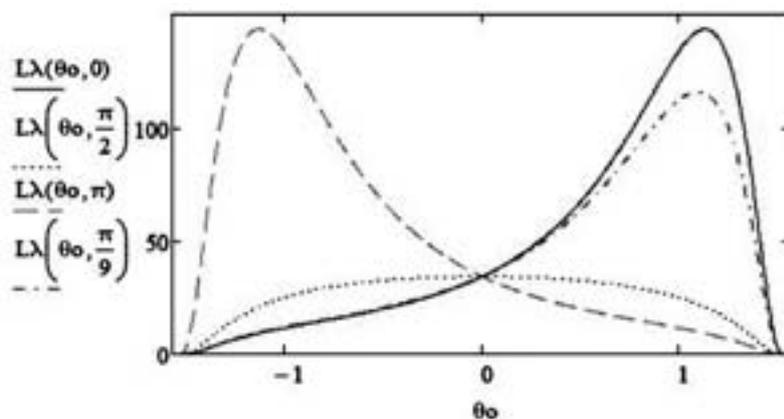


Рисунок 2.

График изменения значения фоновой засветки в зависимости от зенитного угла при заданных значениях азимута Солнца

где  $\tau = 369$  – среднее значение аэрозольной оптической толщи всей земной атмосферы,  $\tau = 0$  – высота над подстилающей поверхностью.

Среднее значение фоновой засветки  $L_\lambda(0,0) = 34,252 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}$ .

Для дальнейших расчетов примем  $L_\phi = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}$  для использования лидара в условиях невысокой засветки.

### РАСЧЕТ ПОРОГОВОГО ПОТОКА

Перед расчетом порогового потока необходимо выбрать приемник излучения. В качестве приемника был выбран фотоэлектронный умножитель Hamamatsu Photosensor Modules H11526 Series-110 NN. Основные характеристики данного ФЭУ:

Спектральная чувствительность  $S_k = 100 \frac{\text{мА}}{\text{Вт}}$

Темновой ток  $I_{ta} = 10^{-8} \text{А}$ ;

Постоянная времени  $\tau = 0,57 \cdot 10^{-9} \text{с}$ ;

Коэффициент усиления  $M=10^6$ .

При расчете порогового потока необходимо учитывать влияние светофильтра на мощность излучения. Для этого приведем значение спектральной ширины светофильтра:  $\Delta\lambda = 1,3 \cdot 10^{-3}$ .

Проведем расчет максимальной дальности действия приемного канала при использовании данного ФЭУ:

$$P_{por} = \frac{\mu \cdot [2e \cdot (I_t + I_\phi) \cdot (1 + B) \cdot \Delta f]^2}{S_k}, \quad (14)$$

где  $\mu = 50$  – отношение сигнал/шум;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – заряд электрона;  $I_t$  – темновой ток фотокатода;  $I_\phi$  – среднее значение тока засветки;  $(1+B \approx 1,5)$  – постоянная приемника излучения;  $\Delta f \approx \frac{1}{\tau_u}$  – эффективная полоса частот фотоприемного устройства.

Т.к. в паспорте ФЭУ приведены значения темнового анодного тока, темновой ток фотокатода рассчитывается по формуле:

$$I_t = \frac{I_{ta}}{M}. \quad (15)$$

$I_\phi$  – среднее значение тока, обусловленное солнечной засветкой:

$$I_\phi = K_{opt} \cdot L_\phi \cdot S_r \cdot \left(1,5 \cdot \alpha_u \cdot \pi \cdot \frac{\alpha_p}{3}\right), \quad (16)$$

где  $S_r$  – площадь приемного объектива,  $S_r = \pi \cdot r_p^2$ .

Мощность фонового излучения:

$$P_\phi = L_\phi \cdot [S_r \cdot (\pi \cdot \alpha_p^2) \cdot \Delta\lambda] = 1,561 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} \quad (17)$$

Очевидно, что мощность фонового излучения крайне мала за счет использования светофильтра, и она не окажет существенного влияния на результаты измерений.

Таким образом, из (14) получим:  $P_{por} = 5,192 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$ .

В этом случае максимальное расстояние, на котором будет выполняться заданное отношение сигнал/шум будет равно 1040 метрам, что удовлетворяет поставленным требованиям.

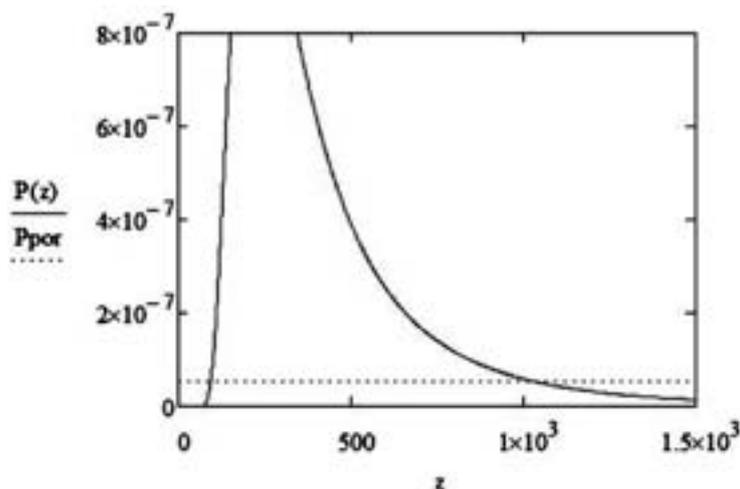


Рисунок 3.

График изменения мощности принимаемого излучения в зависимости от расстояния

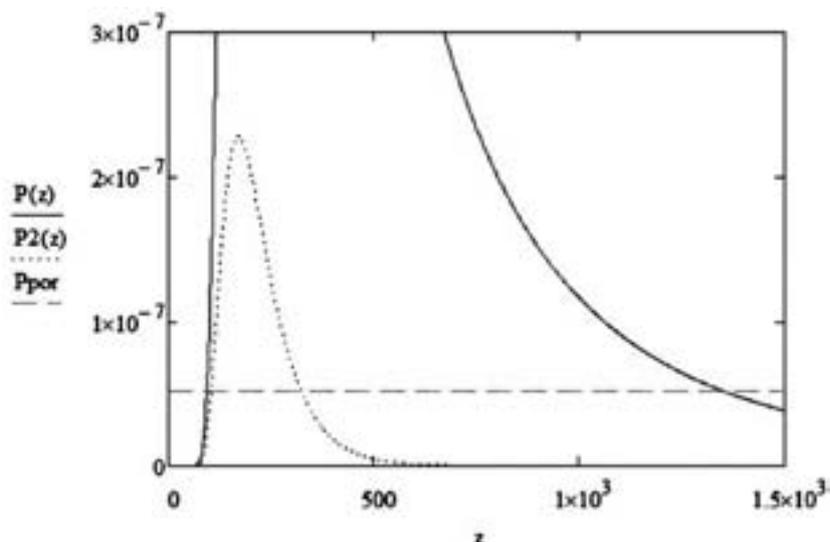


Рисунок 4.

График изменения мощности принимаемого излучения в зависимости от расстояния при  $Sm = 1$  км ( $P(z)$ ),  $Sm = 25$  км ( $P2(z)$ ) и пороговое значение мощности для приемника ФЭУ Hamamatsu H11526

Данные расчеты были проведены для метеорологической дальности видимости равной  $Sm = 10$  км. Для сравнения покажем графики дальности зондирования при значениях метеорологической дальности видимости  $Sm = 1$  км и  $Sm = 25$  км при использовании данного ФЭУ.

По формуле (4):

$$\xi_1 = 50,5 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

$$\xi_{25} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Как видно из рисунка 4, дальность работы лидара при  $Sm = 1$  км не будет превышать 350 м. При  $Sm = 25$  км дальность зондирования составит более 1300 м.

Список литературы:

1. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. М.: Изд-ва МГУ, 1986. - 326 с.
2. Основы импульсной лазерной локации / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. – М.: Изд-во МГТУ, 2010. – 573 с.
3. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Матвиенко Г.Г., Задге Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Новосибирск: Наука, 1985. – 223 с.
4. Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра / В.И. Козинцев, С.Е. Иванов, М.Л. Белов, В.А. Городничев / Оптика атмосферы и океана – 2013 – Том 26; №5.

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, ПОПАВШИХ В ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО, НА ПРИМЕРЕ АСТЕРОИДОВ 2011 CQ1 И 2011 MD

САМБАРОВ Г.Е. – оператор 3-й научной роты КВ ВКС



Самбаров Г.Е.

*Данная работа посвящена исследованию движения астероидов 2011 CQ1 и 2011 MD, сближающихся с Землей (АСЗ). При построении вероятностных областей движения исследуемых АСЗ использовалось 10 тыс. тестовых частиц, покрывающих начальную доверительную область объекта. Уравнения движения были проинтегрированы на интервале времени 2000-2100 гг[1]. В рамках данной работы рассматриваются динамические факторы, которые могут приводить к появлению орбит, способных вызывать опасные сближения и столкновения астероидов с Землей и космическими аппаратами. К таким факторам, в частности, относятся вековые резонансы и связанные с ними проявления детерминированного хаоса. Хаотические движения в резонансе могут возникать в окрестности границ резонансных зон, при перекрытии резонансов.*

**Ключевые слова:** малые тела Солнечной системы, 2011CQ1, 2011MD, динамика, сближения, вековой резонанс, структура возмущений.

## THE FEATURES MOTION OF THE SMALL SOLAR SYSTEM BODIES FALLEN INTO TO THE NEAR-EARTH SPACE, BY THE EXAMPLE OF ASTEROIDS 2011 CQ1 AND 2011 MD

SAMBAROV G.E.

**Annotation.** *This work is devoted to the study of the motion of Near-Earth objects 2011 CQ1 and 2011 MD. When constructing the confidence regions of motion of the NEOs 10,000 test particles covering the initial confidence regions of the object were used. The equations of motion were integrated over the time interval 2000-2100. In this paper, dynamic factors that can lead to the appearance of orbits capable of causing dangerous approaches and collisions of asteroids with the Earth and spacecraft are considered. Such factors, in particular, include secular resonances and associated manifestations of deterministic chaos. Chaotic motions in resonance can occur in the vicinity of the boundaries of resonance bands, when resonances overlap.*

**Keywords:** A Small Solar System Body, 2011CQ1, 2011MD, the dynamical evolution, close encounters, secular resonances, perturbation structure.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный мир подвержен многим опасностям различного характера, и даже такой, как столкновения малых тел Солнечной системы с Землей или космическими аппаратами. Для приближенной оценки этой угрозы используется вероятностный метод определения орбит небесных тел. Так как наблюдения астероидов отягощены неизбежными ошибками, мы можем получить из них только некоторую оценку их возможных параметров. Кроме того, исследование орбитальной эволюции малых тел Солнечной системы, а также задача оценивания вероятности столкновения объекта с Землей требует формирования оптимальной модели возмущающих ускорений, действующих на исследуемый объект. Модель сил, используемая в дифференциальных уравнениях движения астероидов, может содержать различный набор возмущающих ускорений в зависимости от задач, поставленных перед исследователем, типа орбит объекта и его возможных сближений с Землей или космическими аппаратами в околоземном пространстве. Применение менее полной модели может привести к систематическим ошибкам и как следствие непопадание изучаемого объекта в область возможных параметров. Это особенно недопустимо при исследовании столкновения астероидов с Землей. В данной работе на примере астероида 2011 MD были проведе-

ны исследования влияния малых возмущающих параметров, таких как сжатие Земли, сжатие Солнца и релятивистские эффекты на вероятностную модель движения объекта.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ

Астероид 2011 MD был открыт 22 июня 2011 года в Лаборатории поиска околоземных астероидов имени Линкольна (LINEAR). По состоянию на декабрь 2016 года в базе данных центра малых планет [2] содержится 1555 наблюдений этого объекта на интервале времени порядка трех месяцев. На рис. 1а показаны проекции орбит астероида, Меркурия, Венеры, Земли и Марса, и распределение наблюдений на орбите. Несмотря на малость MOID (0.000351 а.е.), данный объект не принадлежит к классу потенциально опасных астероидов вследствие слабой абсолютной звездной величины ( $H = 28.0$ ). По последним данным альbedo 2011 MD равно 0.3 и диаметр составляет около 6 метров [3].

Астероид 2011 CQ1 был обнаружен 4 февраля 2011 года Ричардом А. Ковальски в рамках проекта Каталинский небесный обзор (Catalina Sky Survey). На декабрь 2016 года в базе данных центра малых планет доступно 35 наблюдения объекта, выполненных в течении одного дня. Эксцентриситет орбиты ( $e = 0.205$ ) позволяет астероиду пересекать в проекции на плоскость эклиптики орбиту Марса (ближе к афелию) и приближаться к орбите на достаточно близкое расстояние к

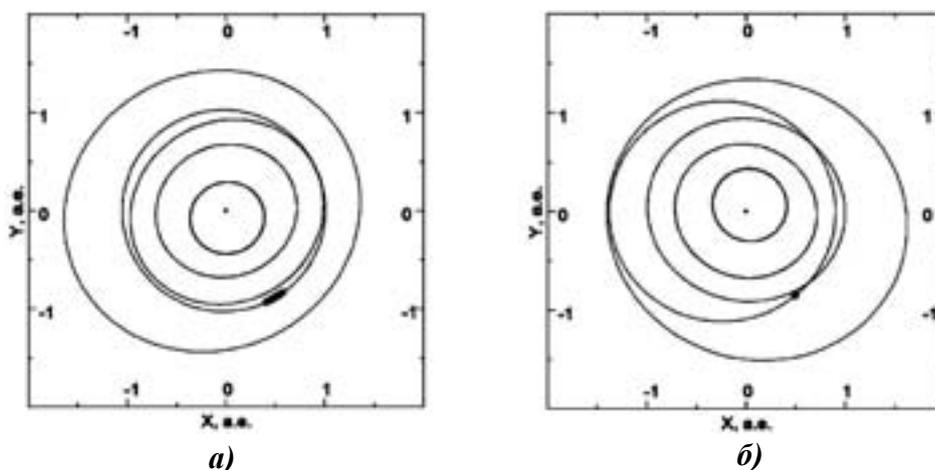


Рисунок 1.

*Проекция орбит АСЗ с их распределением наблюдений на плоскость эклиптики в неподвижной системе координат для а) – 2011 MD и б) – 2011 CQ1*

Земле (в перигелии). Принадлежность к плоской подсистеме ( $i = 5.243^\circ$ ) делает возможными сближения с перечисленными планетами. Данный объект не принадлежит к классу потенциально опасных астероидов вследствие слабой абсолютной звездной величины ( $H = 32.1$ ).

Результаты улучшения орбиты данных объектов приведены в табл. 1, где  $N$  – число наблюдений;  $\Delta t$  – интервал наблюдений в сутках;  $t_0$  – начальная эпоха;  $\sigma$  – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений в угловых секундах.

Коэффициент нелинейности, посчитанный для данных объектов на момент времени  $t_0$ , не превышает критического значения 0.1 [16, 17], что позволяет применять линейные методы к построению начальных доверительных областей.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОЗМУЩЕНИЙ

Следующим шагом исследования динамики АСЗ, является оценка возмущающих факторов, действующих на объект, и выбор оптимальной модели сил. Для выбора необходимых возмущающих факторов использовалась методика, описанная в работе [4, 5], которая позволяет проводить оценку на основе не только эволюции номинальной орбиты, но и размеров начальной доверительной области. Полная модель сил включала в себя: влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Солнца, Земли и Юпитера, релятивистских эффектов от Солнца, больших планет, Плутона и Луны. Координаты больших планет, Плутона и Луны определялись на основании фундаментальных эфемерид DE431 [6]. Дифференциальные уравнения движения Цереры, Паллады и Весты интегрировались совместно с уравнениями движения исследуемого астероида. Релятивистские эффекты учитывались путем добавления шварцшильдовских членов в уравнения движения.

Показатель, с помощью которого можно оценить влияние возмущающего ускорения, задается следующим выражением

$$\varepsilon_{om} = \frac{1}{l}. \quad (1)$$

Таблица 1.

Данные о наблюдениях АСЗ

Объект	$N$	$\Delta t$ , сут.	$t_0$	$\sigma$ , "
2011 MD	1555	74	23.06.2011	0.549
2011 CQ1	35	1	4.02.2011	0.938

Вектор  $\bar{l}$  определяется с помощью соотношения

$$l = \left( \bar{\varepsilon} / \bar{\varepsilon} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\bar{\varepsilon} = (\hat{\mathbf{q}}^* - \hat{\mathbf{q}})^T [\mathbf{R}^T(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{W} \mathbf{R}(\hat{\mathbf{q}})] (\bar{\mathbf{q}} - \hat{\mathbf{q}})$ ;  $\hat{\mathbf{q}}$  и  $\hat{\mathbf{q}}^*$  – оценки наименьших квадратов, полученные для полной и неполной модели движения;  $\bar{\varepsilon} = \sigma_0^2 k_\gamma^2$ ;  $\sigma_0$  – среднеквадратическая ошибка единицы веса  $k_\gamma$  для полной модели движения; величина  $k_\gamma$  оценивается с помощью статистик  $F(m; n - m)$  распределения Фишера;  $\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{d}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}$  – матрица частных производных;  $\mathbf{W}$  – весовая матрица.

Сравнение полученного показателя с некоторым пороговым значением  $\bar{\varepsilon}$  позволяет оценить степень влияния возмущающих ускорений. По нашим численным оценкам  $\bar{\varepsilon}$  следует выбирать в интервале  $0.01 < \bar{\varepsilon} < 0.1$ . [4]

На рис. 2. Представлены результаты исследования структуры возмущения для астероидов 2011 MD и 2011 CQ1 внутри мерного интервала.

Исследование структуры возмущений астероида 2011 MD показало необходимость учета влияния больших планет (кроме Уран, Нептуна и Плутона), Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Остальными силами можно пренебречь без потери точности, поскольку их действие значительно меньше ошибок начальных данных и не оказывает существенного воздействия на орбитальную эволюцию.

Иная ситуация наблюдается у 2011 CQ1, его орбита плохо определена, как было упомянуто выше. Это возможно, связано с тем, что объект близко проходил к Земле и наблюдения покрывают только эти моменты близкого прохождения. Поэтому начальная доверительная область настолько велика, что начальные данные, полученные без учета практически любого возмущающего факторов

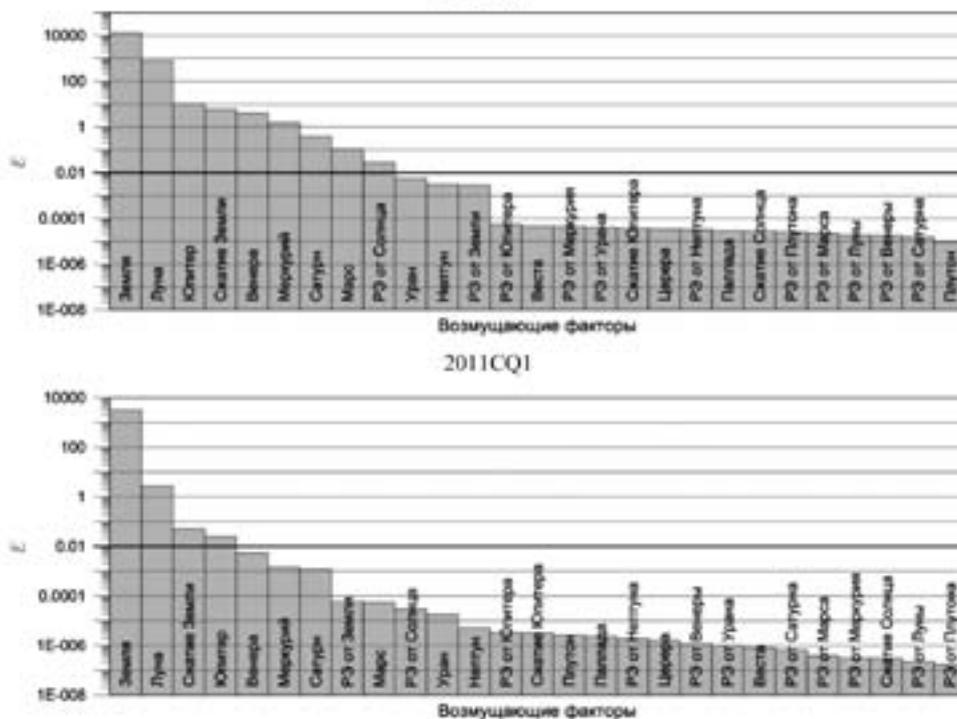


Рисунок 2.

Результаты исследования структуры возмущения для астероидов 2011 MD и 2011 CQ1

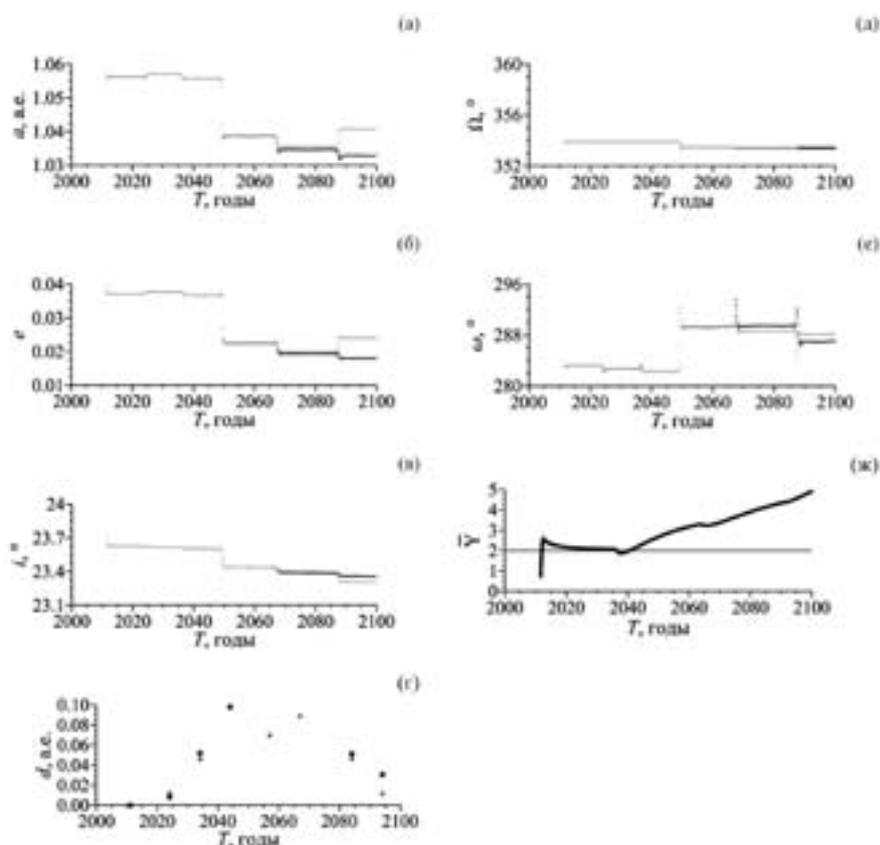


Рисунок 3.

Результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции астероида 2011 MD:  
 а) – эволюция большой полуоси  $a$ ; б) – эксцентриситета  $e$ ; в) – наклона орбиты к эклиптике  $i$ ; г) – тесное сближение с Землей ( $d$  - минимальное расстояние);  
 д) – долготы восходящего узла  $\Omega$ ; е) – аргумент перигелия  $\omega$ ;  
 ж) – усредненного параметра MEGNO на интервале времени 100 лет  
 (номинальной орбиты полной модели – черные точки; без учета сжатия Земли – серые)

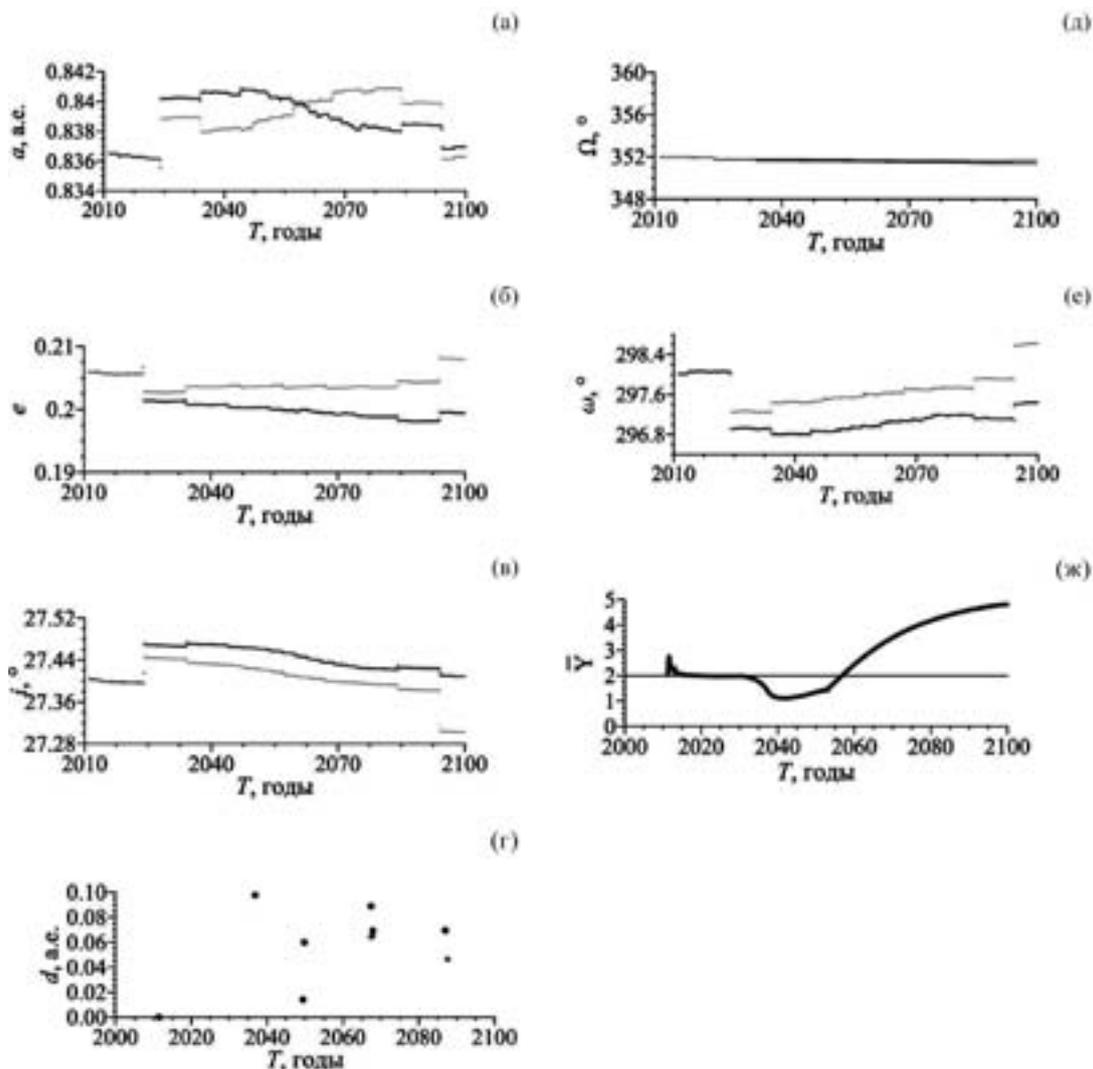


Рисунок 4.

Результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции астероида 2011 CQ1:  
 а) – эволюция большой полуоси  $a$ ; б) – эксцентриситета  $e$ ; в) – наклона орбиты к эклиптике  $i$ ; г) – тесное сближение с Землей ( $d$  – минимальное расстояние);  
 д) – долготы восходящего узла  $\Omega$ ; е) – аргумент перигелия  $\omega$ ;  
 ж) – усредненного параметра MEGNO на интервале времени 100 лет  
 (номинальной орбиты полной модели – черные точки и без учета сжатия Земли – серые)

(за исключением Земли и Луны), не выходят за пределы области, полученной при полной модели. Достоверных выводов о влиянии различных возмущений на движение объекта по имеющимся наблюдениям невозможно сделать. Но можно только предположить, что влияние от Земли и Луны является доминирующим только внутри интервала наблюдений.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Исследование вероятностной орбитальной эволюции проводилось путем численного интегрирования дифференциальных уравне-

ний движения каждой номинальной орбиты, полученной для разных моделей на сто лет вперед.

Как видно из рис. 3 и 4, «малые» возмущающие ускорения, которыми в ряде случаев можно пренебречь, могут оказывать сильное влияние на движение объектов. Так через 100 лет номинальные орбиты полной модели и без учета возмущения от сжатия Земли имеют значительные расхождения в пространстве, кроме этого меняется моменты сближения с Землей и сами расстояния между объектом и планетой (рис. 3г и 4г).

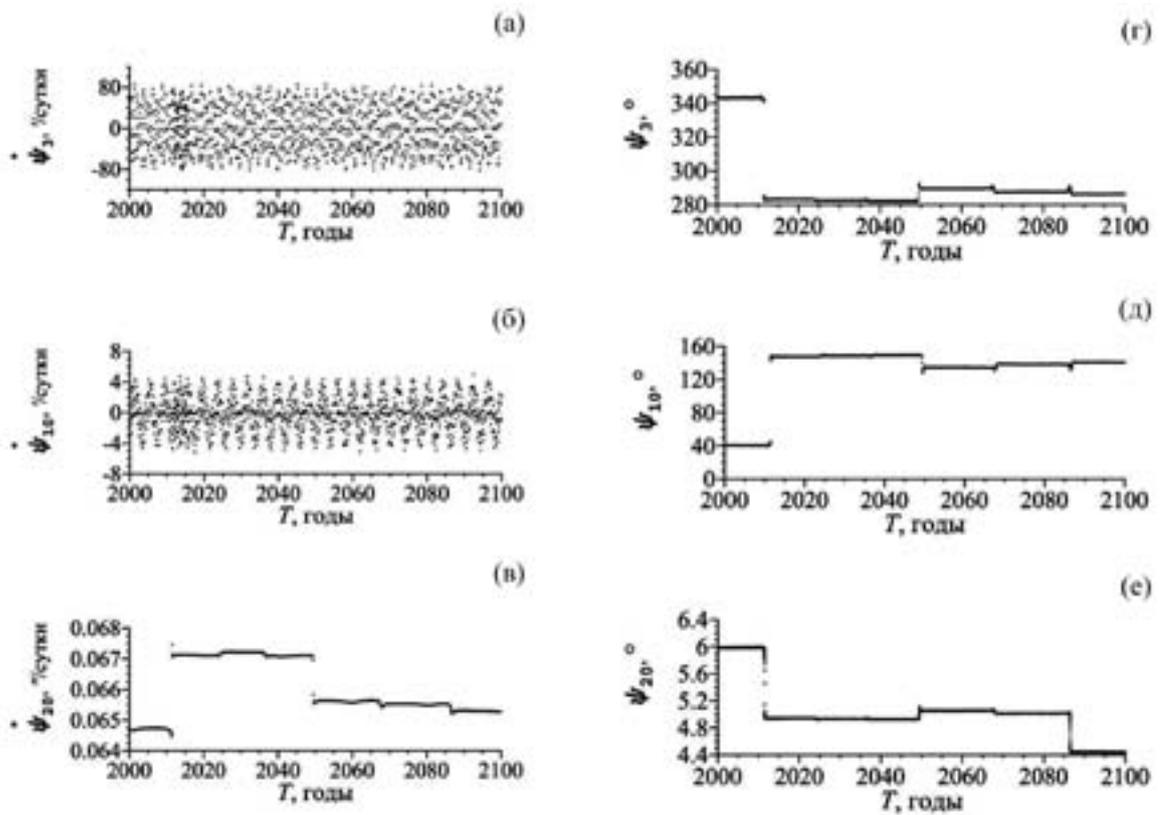


Рисунок 5.

а)–в) – изменение во времени резонансных соотношений,  
 г)–е) их критических аргументов, на интервале времени 100 лет для астероида 2011 MD

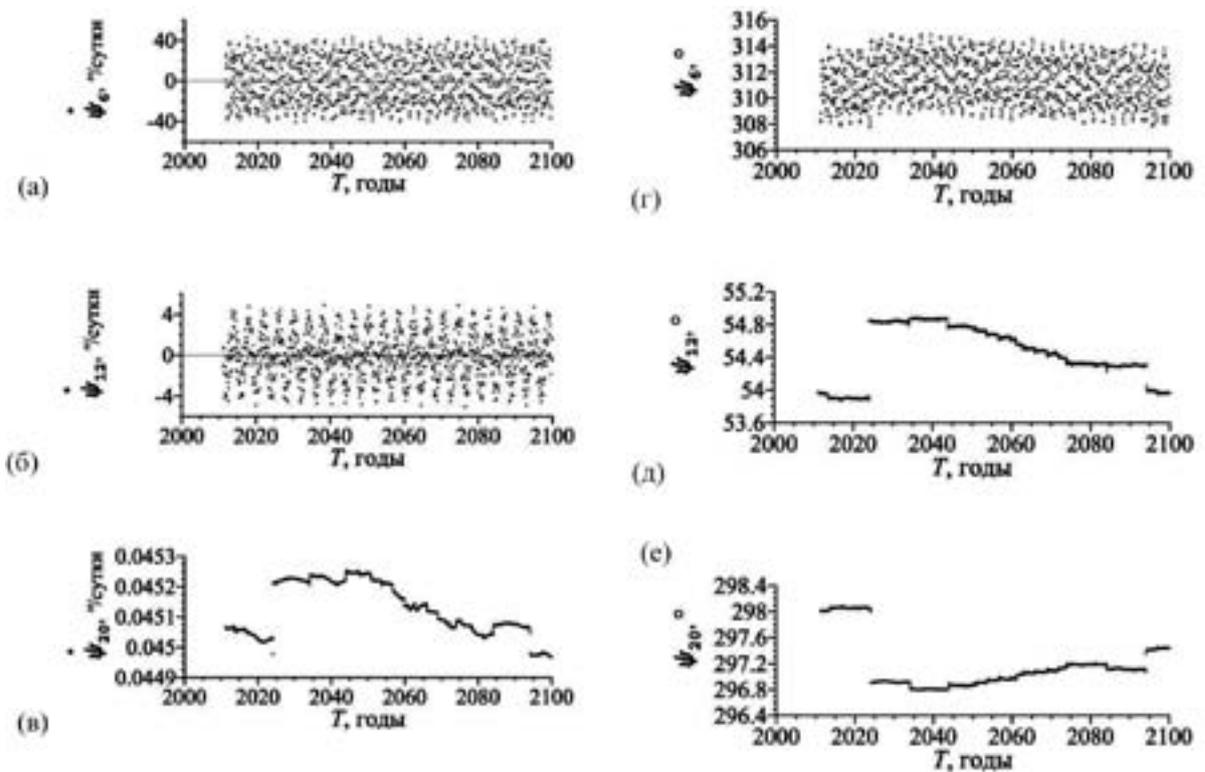


Рисунок 6.

а)–в) – изменение во времени резонансных соотношений,  
 г)–е) их критических аргументов, на интервале времени 100 лет для астероида 2011 CQ1

На астероид 2011 MD действует группа апсидально-нодальных резонансов (рис. 5), с устойчиво либрирующими критическими аргументами на рассматриваемом 100-летнем интервале времени. Большая часть этой группы переходят через нулевое значение, но и на больших временных интервалах имеют нулевые значения. На рис. 5 показаны примеры резонансов  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_3) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_3$ ,  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_3) - 2\dot{\omega}$ , связанный с влиянием Земли, а также резонанс Лидова–Козаи  $\dot{\omega}$ . Представленные резонансы, судя по поведению критических аргументов, либрирующих на всем рассматриваемом временном интервале, являются устойчивыми. Каждое тесное сближение с Землей вносит свои коррективы в движение объекта, об этом свидетельствуют изменения в элементах орбит (рис. 3). После 2055 года параметр MEGNO начинает возрастать, что приводит к проявлению хаотичности в движении.

Аналогичная ситуация прослеживается для астероида 2011 CQ1 (рис. 6), на него тоже, апсидально-нодальные резонансы действуют группой. Поэтому мы приводим только часть примеров, т.к. остальные имеют схожую картину движения. Резонанс Лидова–Козаи  $\dot{\omega}$  имеют устойчивую конфигурацию на всем рассматриваемом интервале, судя по критическому аргументу. Устойчивую структуру имеют резонансы  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_3) - \dot{\omega}$  и  $(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_3) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_3$ , так же как и вся группа апсидально-нодальных резонансов, постоянно колеблясь и переходя через нулевое значение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе представлены результаты исследования долгосрочной орбитальной эволюции астероидов 2011 CQ1 и 2011 MD, движущихся под влиянием вековых резонансов. В результате улучшения орбит по имеющимся наблюдениям выяснилось, что орбита астероида 2011 CQ1 плохо определена, что не позволяет сделать достоверный вывод об его полной картине резонансов и возмущающих факторах.

Исследование структуры возмущения показало необходимость учета влияния для объекта 2011 MD больших планет (кроме Урана, Нептуна и Плутона), Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Анализ эволюции усредненного параметра MEGNO показал, что время предсказуемости движения объектов 2011 CQ1 и 2011 MD составляет порядка 45 и 30 лет, соответственно. На эти два объекта действует группа апсидально-нодальных резонансов, с устойчиво либрирующими критическими аргументами на рассматриваемом 100-летнем интервале времени. Присутствие этих резонансов, а также их перекрытие приводит к проявлению хаотизации движения астероида. «Малые» возмущающие ускорения оказывают сильное влияние на долгосрочную эволюцию движения объектов.

#### Список литературы:

1. Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит. Томск. : НТЛ, 2010. 284 с.
2. Центр малых планет [Электронный ресурс]. URL: <http://www.minorplanetcenter.net/> (дата обращения: 10.01.2017).
3. Mommert, M., Farnocchia, D., Hora, J. L., Chesley, S. R., Trilling, D. E., Chodas, P. W., Mueller, M., Harris, A. W., Smith, H. A., Fazio, G. G. Physical Properties of Near-Earth Asteroid 2011 MD: The Astrophysical Journal Letters, Volume 789, Issue 1, article id. L22, 5 pp., 2014.
4. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы: Астрономический вестник. 2012. Том 46, №3, С.209-222.
5. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных движений астероидов: Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С.235-237.
6. Galushina T.Yu., Sambarov G.E. The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1: Planetary and Space Science. 2017 (в печати).

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНЫХ ГАЗОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ПОДКЛЮЧЕННЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ ДРОССЕЛЕМ

ОСТРОУМОВ И.С. – оператор 3-й научной роты КВ ВКС, магистр



Остроумов И.С.

*В статье приведено описание и функциональная схема автоматического анализатора теплотехнических характеристик топливных газов с последовательно подключенным турбулентным дросселем, его преимущества и особенности.*

**Ключевые слова:** автоматический анализатор, теплотенность газовых топлив, комплексность контроля.

## DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC ANALYZER OF THERMO- TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FUEL GASES WITH A SEQUENTIALLY CONNECTED TURBULENT THROTTLE

OSTROUMOV I.S.

**Annotation.** *The article includes a description and the functional diagram of the automatic analyzer of thermal characteristics of fuel gases with a sequentially connected turbulent throttle, as well as a discussion of its advantages and features.*

**Keywords:** Automatic analyzer, heat value of gas fuels, integrated control.

### ВВЕДЕНИЕ

Наша страна занимает первое место в мире по запасам природного газа самого экологически чистого вида топлива. Для повышения качества поставляемого продукта широко применяются средства и системы аналитического контроля, а именно, автоматические газоанализаторы, которые являются наиболее распространенными средствами аналитического автоматического контроля топливных газов в промышленности и коммерческой деятельности. В нефтехимической, нефтегазодобывающей, нефтегазоперераба-

тывающей и других отраслях промышленности важен и нужен постоянный контроль качества топливных газов, ведь даже небольшие неточности в контроле могут привести к большим экономическим потерям. Данный контроль включает в себя определение таких основных показателей качества топливных газов как низшая объемная удельная теплота сгорания, плотность и индекс Воббе. В настоящее время используется широкий спектр средств автоматического контроля, например газохроматографические анализаторы, калориметры стехиометрического горения, калориметры каталитического горения, кало-

риметры уравнивающего измерительного преобразования, влажные калориметры, калориметры косвенного измерения и др. В то же время, лишь небольшое число найденных технических решений используются для создания анализаторов. В основном сейчас для контроля основных показателей качества топливных газов используются газовые хроматографы. Использование газовых хроматографов хотя и является универсальным, но хроматографический анализ базируется на определении состава газового потока и последующих расчетов показателей качества по известным зависимостям. Недостатком хроматографического контроля являются достаточно длительный период определения состава. Кроме того для работы хроматографов требуются значительные объемы (несколько литров) анализируемого газа. Таким образом является актуальной разработка новых технических средств, способных не хроматографическим методом определять теплотехнические характеристики топливных газов.

#### **ОПИСАНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА**

Изобретение относится к области аналитической техники и может быть использовано для автоматического контроля теплоценности газообразных топлив. Автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив содержит камеру, в днище которой установлена горелка для формирования пламени во внутренней полости камеры, буферную колонку, выход которой через тройник соединен с входом горелки и трубопроводом подачи водорода в горелку, автоматический дозатор с двумя входными штуцерами, соединенными с трубопроводом анализируемого газа и трубопроводом газа-носителя, термопару, расположенную над горелкой и подключенную последовательно к нормирующему преобразователю и устройству обработки и отображения информации. В анализаторе по ходу движения газа-носителя за автоматическим дозатором и перед буферной колонкой дополнительно установлены соответственно вспомогательная колонка и тур-

булентный дроссель. Технический результат - повышение достоверности и точности получаемых данных.

Известен автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив (Измерения в промышленности. Справочник. Под ред. П. Профоса. - М.: Металлургия, 1980. С. 440-441), содержащий горелку, размещенную во внутренней полости жидкостного теплообменника, на выходе и входе которого установлены батареи термопар, а также потенциометр и аппаратуру для стабилизации потоков анализируемого газа и воды. Оценка теплоценности газообразного топлива таким анализатором осуществляется по разности сигналов батарей термопар, которая возникает за счет нагревания воды в теплообменнике при сгорании анализируемого газа.

Недостатком этого анализатора является то, что он обеспечивает получение информации только о высшей объемной удельной теплоте сгорания анализируемого газа, которая не является однозначной товарной характеристикой качества газообразного топлива.

Наиболее близким по технической сущности является автоматический анализатор объемной теплоты сгорания газообразных топлив (Автоматический анализатор объемной теплоты сгорания газообразных топлив. Патент на полезную модель RU №30993, МПК7 G01N 25/22, бюл. №19, 2003), содержащий камеру, в днище которой установлена горелка для формирования пламени во внутренней полости камеры, снабженная штуцером для подачи водорода, буферную колонку, автоматический дозатор с двумя входными штуцерами, соединенными с трубопроводом анализируемого газа и трубопроводом газаносителя, термопару, расположенную над горелкой и подключенную последовательно к нормирующему преобразователю и к устройству обработки и отображения информации. Определение теплоты сгорания газообразного топлива осуществляется по температуре газообразных продуктов сгорания.

Недостатком такого анализатора является то, что он позволяет измерять только низшую объемную удельную теплоту сгорания

газообразного топлива, которая лишь частично определяет качество газообразного топлива, а при товарном учете газообразных топлив помимо информации о низшей объемной удельной теплоте сгорания используется еще и информация о плотности и числе Воббе.

Задачей изобретения является получение возможности комплексной автоматической оценки теплоценности газообразных топлив, которая характеризуется низшей объемной удельной теплотой сгорания, плотностью и числом Воббе.

Технический результат - создание автоматического анализатора, позволяющего получить информацию о низшей объемной удельной теплоте сгорания, числе Воббе и плотности газообразного топлива.

Технический результат достигается тем, что автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив, содержащий камеру, в днище которой установлена горелка для формирования пламени во внутренней полости камеры, снабженная штуцером для подачи водорода, буферную колонку, автоматический дозатор с двумя входными штуцерами, соединенными с трубопроводом анализируемого газа и трубопроводом газа-носителя, термопару, расположенную над горелкой и подключенную последовательно к нормирующему преобразователю и к устройству обработки и отображения информации, согласно изобретению по ходу движения газа-носителя за автоматическим дозатором и перед буферной колонкой дополнительно установлены соответственно вспомогательная колонка и турбулентный дроссель.

Такая конструкция анализатора позволяет в процессе одного анализа измерять низшую объемную удельную теплоту сгорания, плотность и число Воббе анализируемого газообразного топлива за счет использования вспомогательной колонки и турбулентного дросселя, протекание постоянной по объему пробы анализируемого газа через который при использовании в качестве газа-носителя водорода приводит к уменьшению расхода последнего, что вызывает уменьшение тем-

пературы продуктов сгорания, которые зависят от плотности анализируемого газа.

По сравнению с прототипом заявляемая конструкция имеет отличительную особенность в совокупности элементов и их взаимном расположении.

Автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив (рис. 1) содержит камеру 1, в днище 2 которой установлена горелка 3 для формирования пламени во внутренней полости 4 камеры 1, буферную колонку 5, выход 6 которой через тройник 7 соединен со входом 8 горелки 3 и трубопроводом подачи водорода 9 в горелку, автоматический дозатор 10, входные штуцера 11 и 12 которого соединены соответственно с трубопроводом анализируемого газа 13 и трубопроводом газа-носителя 14, термопару 15, расположенную над горелкой 3 и подключенную последовательно к нормирующему преобразователю 16 и к устройству обработки и отображения информации 17.

Анализатор также включает в свой состав стабилизаторы расхода воздуха 20, водорода 21, газа-носителя (водорода) 22 и программатор 24 для управления работой анализатора.

Автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив является измерительным устройством циклического действия и имеет два режима работы: «Подготовка» и «Анализ», которые реализуются следующим образом. Непрерывно в анализатор из стабилизаторов расхода 20-23 воздуха, водорода, анализируемого газа и газа-носителя (водорода) подаются с постоянными расходами эти газы. Водород сгорает в горелке 3, температура газообразных продуктов сгорания измеряется термопарой 15 и нормирующим преобразователем 16. В режиме «Подготовка» (в интервале времени  $T_n = t_2 - t_1$ ) в горелке 3 сгорает только водород, а формирующийся при этом сигнал термопары 15 принимают за начальный уровень сигнала анализатора  $U_0$ . Затем в момент времени  $t_2$  по команде программатора 24 автоматический дозатор 10, а с ним вместе и весь анализатор переводятся в режим работы «Анализ». При этом проба анализируемого газа вводится автоматиче-

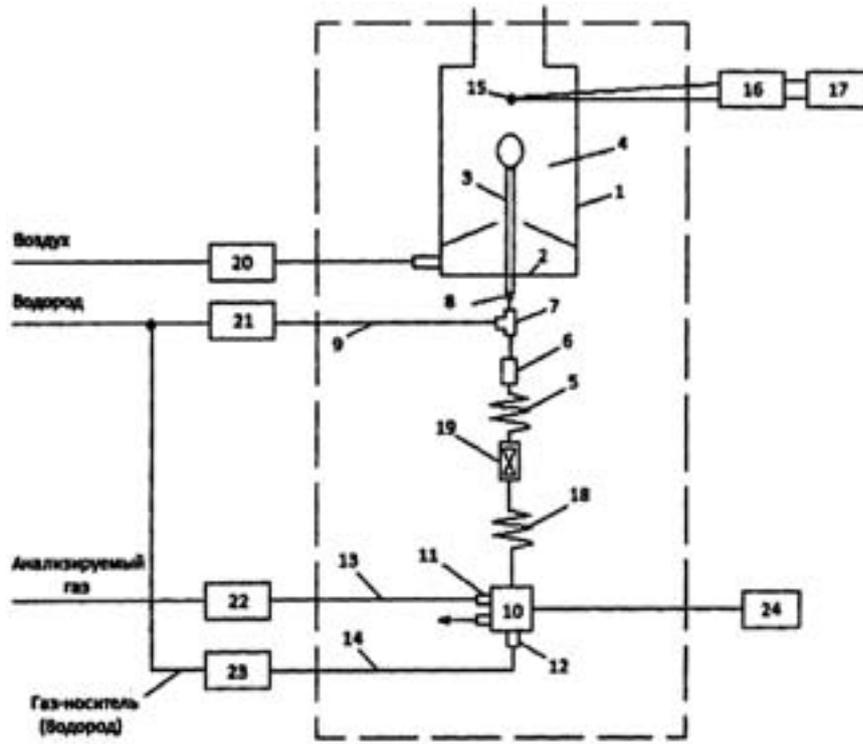


Рисунок 1.

Схема автоматического анализатора теплотенности газообразных топлив

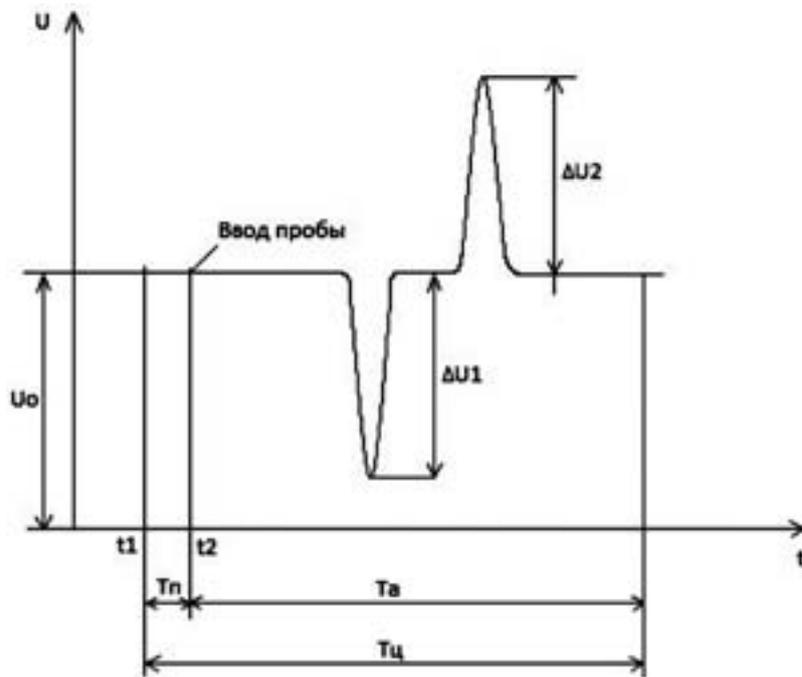


Рисунок 2.

Сигналы автоматического анализатора теплотехнических характеристик топливных газов

ским дозатором 10 в поток газа-носителя и транспортируется им последовательно через вспомогательную колонку 18, турбулентный дроссель 19 и буферную колонку 5. С выхода этой колонки проба газа попадает в тройник 7, а затем на вход 8 горелки 3. При протекании пробы газа через турбулентный дроссель 19 расход газа-носителя (водорода) уменьшается. Это вызывает уменьшение количества водорода, сгорающего в единицу времени в пламени горелки 3. Поэтому уменьшается температура продуктов сгорания, омывающих термопару 15, что, в свою очередь, уменьшает сигнал термопары и выходной сигнал нормирующего преобразователя 16.

Таким образом формируется первый импульсный сигнал  $\Delta U_1$  (рис. 2), поступающий в устройство обработки и отображения информации 17. Этот сигнал связан с плотностью анализируемого газа. Объем буферной колонки 5 подбирается так, что проба анализируемого газа остается в этой колонке до полного истечения пробы анализируемого газа из турбулентного дросселя в буферную колонку, т.е. до окончания формирования сигнала  $\Delta U_1$ . После этого проба анализируемого газа транспортируется в горелку 3, а затем постепенно сгорает в водородном пламени этой горелки. При этом увеличивается температура продуктов сгорания, что вызывает увеличение сигнала термопары 15. В результате на выходе нормирующего преобразователя 16 формируется второй импульсный сигнал  $\Delta U_2$  (рис. 2), который воспринимается устройством обработки и отображения информации 17. Этот сигнал зависит от низшей объемной удельной теплоты сгорания анализируемого газа.

На этом заканчивается режим работы «Анализ», продолжительность которого занимает интервал времени  $T_a$ . В дальнейших циклах работы анализатора все операции повторяются.

Сигналы  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  (рис. 2) используются устройством обработки и отображения информации 17 для определения значений низшей объемной теплоты сгорания анализируемого газа, его плотности в нормальных усло-

виях и числе Воббе. При этом учитываются следующие модели сигналов анализатора:

амплитуда первого сигнала описывается выражением:

$$\Delta U_1 = K_1 \cdot (Q_H - Q_{Г-Н})$$

где  $K_1$  - коэффициент преобразования анализатора по теплоте сгорания;

$Q_H$  - низшая объемная удельная теплота сгорания анализируемого газа;

$Q_{Г-Н}$  - низшая объемная удельная теплота сгорания газа-носителя (водорода),

амплитуда второго сигнала описывается выражением:

$$\Delta U_2 = K_2 \cdot (\rho_H - \rho_{Г-Н})$$

где  $K_2$  - коэффициент преобразования анализатора по плотности;

$\rho_H$  - плотность анализируемого газа в нормальных условиях;

$\rho_{Г-Н}$  - плотность газа-носителя (водорода) в нормальных условиях.

Из моделей (1) и (2) при известных значениях сигналов  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$ , коэффициентов преобразования  $K_1$  и  $K_2$ , значениях  $Q_{Г-Н}$  и  $\rho_{Г-Н}$  в устройстве обработки и отображения информации 17 определяются величины  $Q_H$  и  $\rho_H$ , а число Воббе вычисляется по формуле:

$$ЧВ = \frac{Q_H}{\sqrt{\rho_{Отн}}} \quad (2)$$

где  $\rho_{Отн}$  - относительная плотность анализируемого газа в нормальных условиях по воздуху.

$$\rho_{Отн} = \frac{\rho_H}{\rho_{Воз,Н}} \quad (3)$$

где  $\rho_{Воз,Н}$  - плотность воздуха в нормальных условиях.

При экспериментальных исследованиях предлагаемого анализатора теплоценности газообразных топлив, выполненных при расходе водорода 2 л/час, воздуха 12 л/час, газа-носителя (водорода) 2 л/час, было установлено, что за время одного анализа, который длится 90-100 секунд, оказывается возможным измерить все основные характеристики, определяющие теплоценность газообразных топлив. Причем, так как в анализаторе все время сгорает водород, он позволяет осуществлять анализ как природных, так и бедных (горючими компонентами) газов.

Таким образом, предлагаемый анализатор теплоценности газообразных топлив обеспечивает полный контроль качества газообразных топлив, так как позволяет получить информацию о низшей теплоте сгорания, числе Воббе и плотности этого топлива.

Предлагаемый автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив может быть реализован на базе существующих автоматических анализаторов теплоты сгорания газообразных топлив при введении в его конструкцию дополнительных элементов: вспомогательной колонки и турбулентного дросселя.

Анализатор может найти широкое применение для контроля теплоценности газообразных топлив на магистральных трубопроводах и газопроводах промышленных предприятий.

Автоматический анализатор теплоценности газообразных топлив, содержащий камеру, в днище которой установлена горелка для формирования пламени во внутренней полости камеры, снабженная штуцером для подачи водорода, буферную колонку, автоматический дозатор с двумя входными штуцерами, соединенными с трубопроводом анализируемого газа и трубопроводом газаносителя, термопару, расположенную над горелкой и подключенную последовательно к нормирующему преобразователю и к устройству обработки и отображения информации, отличающийся тем, что по ходу движения газаносителя за автоматическим дозатором

и перед буферной колонкой дополнительно установлены соответственно вспомогательная колонка и турбулентный дроссель.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимуществом предлагаемого технического решения является:

- простота контроля теплоценности газообразного топлива;
- комплексность контроля;
- возможность использования в системах товарного учета газообразных топлив;
- простота конструкции;
- возможность определения теплоценности бедных (горючими компонентами) газов.

Список литературы:

1. Александров Ю.И. и др. // Заводская лаборатория. – 1997. - №11. – С.1.
2. Арский А.К. Природный газ в энергетике США. / Под. ред. В.М.Гальперина.- М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 208с.
3. А. с. СССР 1420496, 1988 / Способ непрерывного определения теплоты сгорания. Волков А.П., Рыков В.А.
4. А. с. СССР 1742694, 1992 / Устройство для непрерывного измерения теплоты сгорания газообразных и жидких топлив. Соловьев В.И., Волков А.П., Рыков В.А., Шуринов С.Г.
5. Бобрицкий Н.В., Юфин В.А. Основы нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1988. – 199с.
6. Дубровский В.В. АСУ технологическими процессами в газовой промышленности. – Киев: Техніка, 1977. – 79с.

## МНОГОМОДОВЫЙ МОНОИМПУЛЬСНЫЙ РУПОРНЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ АНТЕННОГО УСТРОЙСТВА КАНАЛА ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАЧИ КОМАНД И СОПРОВОЖДЕНИЯ КА ЗЕМНОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

КОНЬШИН В.И. – оператор 3-й Научной роты КВ ВКС

ЖАРГАЛОВ Б.И. – оператор 3-й Научной роты КВ ВКС

ЛИТВИНОВ С.А. – лейтенант, командир взвода Научной роты КВ ВКС



Коньшин В.И.

*В статье рассматривается принцип работы антенного устройства, в частности многомодового моноимпульсного облучателя. Разработана схема облучателя с применением современных САПР. Произведен выбор конструкции облучателя. Проведен расчет диаграмм направленности облучателя и антенны и их моделирование. Так же произведена настройка облучателя на коэффициент стоячей волны.*

**Ключевые слова:** радиолокация, СВЧ, рупорный облучатель, зеркальная параболическая антенна, земная станция спутниковой связи, геостационарная орбита, диаграмма направленности, КСВ, FEKO, MathCAD, Inventor.

## MULTIMODE SINGLE-PULSE HORN FEEDER OF THE ANTENNA DEVICE OF THE CHANNEL FOR RECEIVING INFORMATION, TRANSMITTING COMMANDS AND ACCOMPANYING SPACE STATION SATELLITE EARTH STATION

KONSHIN V.I., ZHARGALOV B.I., LITVINOV S.A

**Annotation.** *The principle of operation of an antenna device, in particular a multimode monopulse irradiator, is considered in the article. A scheme of the irradiator with the use of modern CAD is developed. The choice of the irradiator design was made. The calculation of the radiation patterns of the irradiator and the antenna and their modeling are carried out. The irradiator has also been tuned to the standing wave ratio.*

**Keywords:** Radar, microwave, horn irradiator, mirror parabolic antenna, satellite earth station, geostationary orbit, directional pattern, SWR, FEKO, MathCAD, Inventor.

Развитие и использование космических аппаратов (КА) в настоящее время стимулирует развитие целого ряда отраслей радиоэлектроники, в том числе таких как, радиоуправление, радиотелеметрия, радиосвязь, передача данных и др. Для обеспечения нормального функционирования спутниковых систем создаются наземные комплексы управления и слежения за КА, которые оснащены командно-измерительными радиолиниями «Земля-КА». Требования обеспечения достаточного потенциала радиолиний при жёстких требованиях к точности измерения параметров движения КА, помехозащищенности и надёжности передачи информации вызвало практическую потребность улучшения всех элементов радиолинии, в том числе и антенных систем.

Современные спутниковые системы основаны на использовании КА, находящихся на геостационарных орбитах либо на сильно вытянутых высокоэллиптических орбитах. В обоих случаях расстояние между КА и наземным комплексом может составлять несколько десятков тысяч километров. Допустимый уровень излучения с борта КА ограничен из-за опасности создания помех другим радиотехническим системам. Следовательно, для обеспечения необходимого отношения сигнал-шум антенна наземного комплекса должна обладать высоким коэффициентом усиления (до 50 дБ и более) и, как следствие, иметь весьма узкую диаграмму направленности (ДН) (единицы - десятки угловых минут).

Высокие требования предъявляются также к системам наведения, автосопровождения и измерения координат КА.

Среди различных типов наземных антенн спутниковых систем важное место занимают и широко распространены зеркальные антенны с использованием рупорных облучателей.

Приемно-передающий рупорный облучатель предназначен для слежения, сопровождения и определения координат космических аппаратов (КА).

Необходимость разработки вызвана тем, что изменились параметры информационно-управляющей системы.

Расчет рупорных антенн основан на результатах анализа их характеристик, т. е. первоначально ориентировочно задаются геометрическими размерами антенны, а затем определяют электрические параметры. Если размеры выбраны неудачно, то расчет повторяется снова.

Поле излучения рупорной антенны, как и всех антенн СВЧ, определяется приближенным методом. Сущность приближения заключается в том, что несмотря на связь между полем внутри и вне рупора, внутреннюю задачу решают независимо от внешней, и полученные из этого решения значения поля в плоскости раскрыва рупора используют для решения внешней задачи.

Амплитудное распределение поля в раскрыве рупора принимается таким же, как в питающем его волноводе. Например, при возбуждении рупора прямоугольным волноводом с волной  $H_{10}$ , вдоль оси  $S$  (проходящей в плоскости  $H$ ) распределение амплитуды поля косинусоидальное, а вдоль оси  $U$  (проходящей в плоскости  $E$ ) амплитудное распределение равномерное. В связи с тем, что фронт волны в рупоре не остается плоским, а трансформируется в цилиндрический в секториальном рупоре и в сферический в пирамидальном и коническом, то фаза поля по раскрыву меняется по квадратичному закону.

Диаграмма направленности рупорной антенны по известному полю в раскрыве может рассчитываться методом волновой оптики на основе принципа Гюйгенса – Кирхгофа [1].

Имея выражение для диаграммы направленности, можно найти коэффициент направленного действия антенны, зависимость ширины диаграммы направленности от размеров раскрыва и другие характеристики антенны.

Для приближенного расчета диаграммы направленности раскрыв моноимпульсного рупорного облучателя может быть представлен разделенным на две секции, как показано на рис. 1.

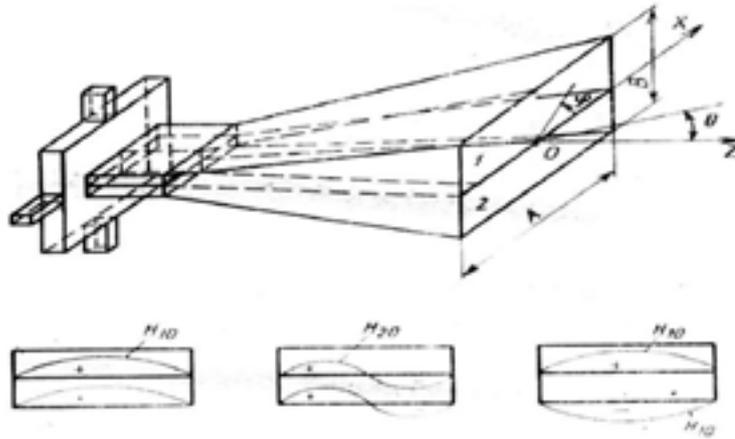


Рисунок 1.

Схема моноимпульсного рупорного облучателя

В двухсекционном рупоре суммарная диаграмма направленности формируется за счет синфазного возбуждения верхней и нижней секций волнами  $H_{10}$ . Разностная диаграмма направленности в плоскости  $H$  формируется за счет возбуждения в верхней и нижней секциях синфазных волн  $H_{20}$ , так как горизонтальный размер рупора обеспечивает возникновение и распространение этого типа колебаний.

Формирование разностной диаграммы направленности в плоскости  $E$  достигается за счет возбуждения противофазных волн  $H_{10}$  в верхней и нижней секциях рупора.

Диаграммы направленности по полю такого рупорного облучателя получены с учетом явления дифракции на прямоугольном отверстии, возбуждаемом соответствующими типами волн:

$$F_{\Sigma HE}(\theta, \phi) = \frac{\sin^2 \theta_0}{\cos^2 \theta_0 + 1} \times \sqrt{\sin^2 \phi (\cos \theta_0 \cos \theta + 1)^2 + \cos^2 \phi (\cos \theta_0 + \cos \theta)^2} \times \\ \times \frac{\sin\left(\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi} \times \frac{\sin\left(\frac{kA}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi}$$

- суммарная диаграмма направленности, где

$$\sin \theta_0 = \frac{\lambda}{2A}; \quad \cos \theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}.$$

$$F_{\Delta H}(\theta, \phi) = \frac{\sin^2 \theta_1}{\cos \theta_1 + 1} \times \sqrt{\sin^2 \phi (\cos \theta_1 \cos \theta + 1)^2 + \cos^2 \phi (\cos \theta_1 + \cos \theta)^2} \times \\ \times \frac{\sin\left(\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi} \times \frac{\sin\left(\frac{kA}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi}$$

- разностная диаграмма направленности в магнитной плоскости, где

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{A}; \quad \cos \theta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{A}\right)^2}.$$

$$F_{\Delta E}(\theta, \phi) = \frac{\sin^2 \theta_0}{\cos \theta_0 + 1} \times \sqrt{\sin^2 \phi (\cos \theta_0 \cos \theta + 1)^2 + \cos^2 \phi (\cos \theta_0 + \cos \theta)^2} \times \\ \times \frac{1 - \cos\left(\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi\right)}{\frac{kB}{2} \sin \theta \sin \phi} \times \frac{\cos\left(\frac{kA}{2} \sin \theta \cos \phi\right)}{\sin^2 \theta_0 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi}$$

- разностная диаграмма направленности в электрической плоскости.

Диаграммы направленности в главных плоскостях Н и Е соответственно имеют вид:

$$F_{\Sigma H}(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{kA}{2} \sin \theta\right)}{\sin^2 \theta_0 - \sin^2 \theta} (\cos \theta + \cos \theta_0),$$

$$F_{\Sigma E}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{kB}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kB}{2} \sin \theta} (\cos \theta \cos \theta_0 + 1)$$

- суммарная диаграмма направленности в плоскости Н и Е, формируемая синфазными волнами  $H_{10}$ ;

$$F_{\Delta H}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{kA}{2} \sin \theta\right)}{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta} (\cos \theta_1 + \cos \theta)$$

- разностная диаграмма направленности в плоскости Н, формируемая синфазными волнами  $H_{20}$ ;

$$F_{\Delta E}(\theta) = \frac{\sin^2\left(\frac{kB}{2}\right)}{\sin \theta} (\cos \theta \cos \theta_0 + 1)$$

- разностная диаграмма направленности в плоскости Е, формируемая противофазными волнами  $H_{10}$ , где:

$$\cos \theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2A}\right)^2}.$$

При проектировании рупора по заданной диаграмме направленности порядок расчета следующий:

1. По ширине  $2\theta_{0,1}$  нормированных диаграмм направленности по мощности  $P_{\Sigma E}(\theta)$  и  $P_{\Sigma H}(\theta)$  на уровне  $-10$  дБ определяют ориентировочные размеры рупора. По техническим требованиям ширина диаграммы направленности  $2\theta_{0,1} = 52^\circ$ .

Таким образом, размеры рупора определяются из формул:

$$P_{\Sigma E}(\theta_{0,1}) = \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi B}{\lambda} \sin 26^\circ\right)}{\frac{\pi B}{\lambda} \sin 26^\circ} \right]^2 = 0,1$$

$$P_{\Sigma H}(\theta_{0,1}) = \left[ \frac{\cos\left(\frac{\pi A}{\lambda} \sin 26^\circ\right)}{1 - \left(\frac{\pi A}{\lambda} \sin 26^\circ\right)} \right]^2 = 0,1$$

Решая численно приведенные выше уравнения получаем следующие размеры раскрыва:

$$\frac{A}{\lambda} = \frac{300}{130} = 2,3; \quad \frac{B}{\lambda} = \frac{250}{130} = 1,9.$$

2. По найденным размерам раскрыва определяют соответствующий коэффициент направленного действия.

Коэффициент направленного действия (КНД)  $D$  – число, показывающее, во сколько раз пришлось бы увеличить мощность излучения антенны при переходе от направленной антенны к ненаправленной при условии сохранения одинаковой напряженности поля в месте приема (при прочих равных условиях), примерно равен:

$$D = 0,81 \frac{4\pi S}{\lambda^2} = 0,81 \frac{4\pi AB}{\lambda^2} = 45$$

3. Анализ показывает, что КНД достигает своего максимального значения, при

$$R_H \geq \frac{A^2}{3\lambda}; \quad R_E \geq \frac{B^2}{2\lambda}$$

Таким образом, выбирается длина пирамидального рупора в двух плоскостях.

4. С точки зрения помехозащищенности важной характеристикой облучателя является уровень боковых лепестков диаграмм направленности. Мы его можем определить непосредственно применив формулы для расчета нормированных диаграмм направленности по мощности  $P_{\Sigma H}$  и  $P_{\Sigma E}$ . Но для приближенных оценок можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\delta_{E_p} = \left[ \frac{2}{(2p+1)\pi} \right]^2; \quad \delta_{H_p} = \left[ \frac{1}{2(p+1)^2 - 1} \right]^2$$

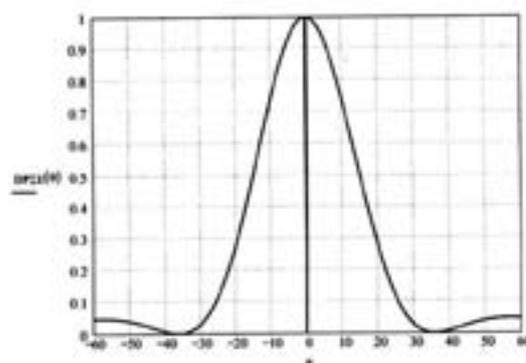
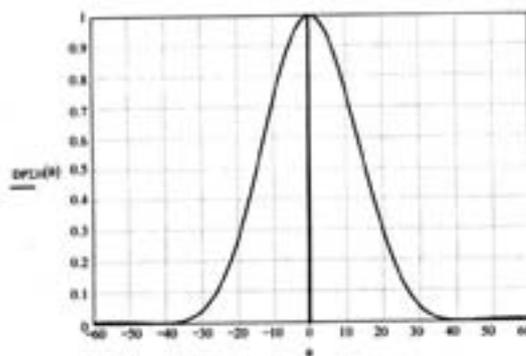
- где  $p$  - порядковый номер бокового лепестка.

Максимумы первых боковых лепестков диаграмм направленностей:

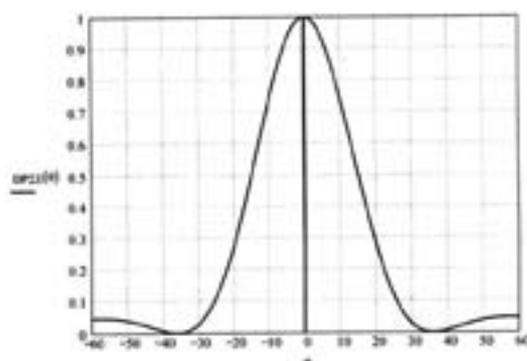
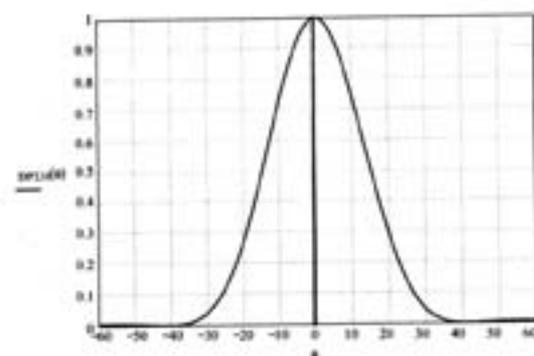
$$\delta_{E_1} = \left[ \frac{2}{(2p+1)\pi} \right]^2 = 0,05;$$

$$\delta_{H_1} = \left[ \frac{1}{4(p+1)^2 - 1} \right]^2 = 0,004$$

Расчетные нормированные диаграммы направленности облучателя представлены на рис. 2 и 3



**Рисунок 2.**  
Расчетные диаграммы направленности суммарных каналов



**Рисунок 3.**  
Расчетные диаграммы направленности разностных каналов

## НАСТРОЙКА ОБЛУЧАТЕЛЯ НА КСВ

Измерения КСВ облучателя (рис. 4) производились при помощи комплекса программ ФЕКО.

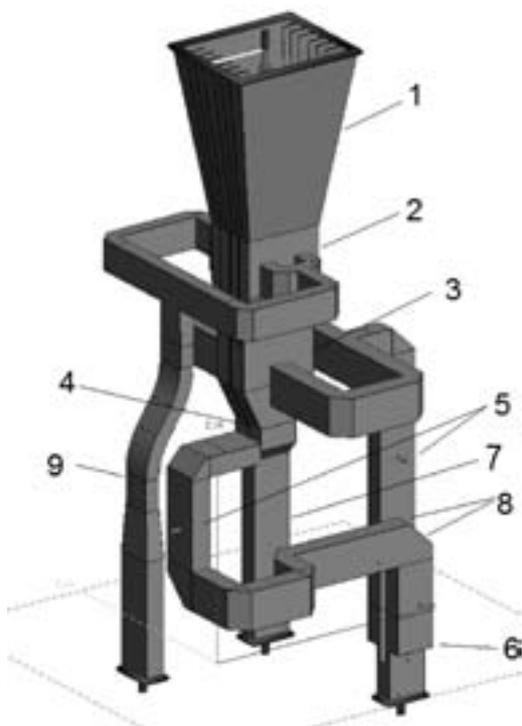


Рисунок 4.

*Рупорный моноимпульсный облучатель:*

1 - пирамидальный рупор, 2 - возбуждатель передающего канала, 3 - возбуждатель разностного  $\Delta\beta$  канала, 4 - возбуждатель суммарного и разностного  $\Delta\epsilon$  каналов, 5 - фильтры, 6 - коммутатор, 7 - тракт суммарного канала ( $\Sigma$ ), 8 - тракт разностного канала ( $\Delta$ ), 9 - тракт передающего канала (1).

Настройка осуществлялась с помощью индуктивных штырей разного диаметра. Сначала настраиваются отдельные волноводные узлы облучателя на минимальный КСВ. Место положения штырей определялось экспериментально. После сборки облучателя при необходимости производилась окончательная подстройка передающего, суммарного и разностных каналов (без коммутатора), путем установки дополнительных штырей вблизи выходных фланцев.

Ввиду нехватки мощности доступной ЭВМ была произведена настройка КСВ облучателя только на центральных частотах на прием и на передачу сигнала.

Разберем подробно на примере коммутатора. Сечение коммутатора показано на рисунке 5

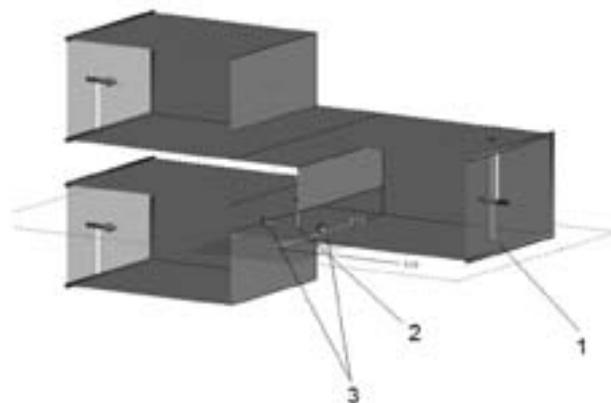


Рисунок 5.

*Сечение коммутатора: 1 – индуктивный стержень, 2 – p-i-n диод, 3 – настроечные винты*

Сначала был проведен эксперимент с использованием разных положений настроечных винтов на широком диапазоне частот от 2 до 3 ГГц. В результате были получены результаты, показанные на рис. 6. Видно, что при среднем положении винтов, мы получаем оптимальную ширину петли, теперь нам необходимо передвинуть центр петли в единичную точку диаграммы Смита. Для этого был внедрен индуктивный стержень и подобрано такое положение, при котором мы получаем оптимальное значение КСВ (рис. 7), расстояние от фланца – 2 см, от узкой стенки волновода 13 см.

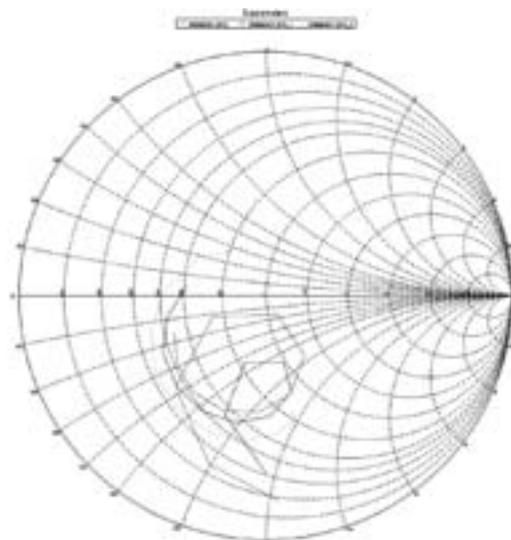
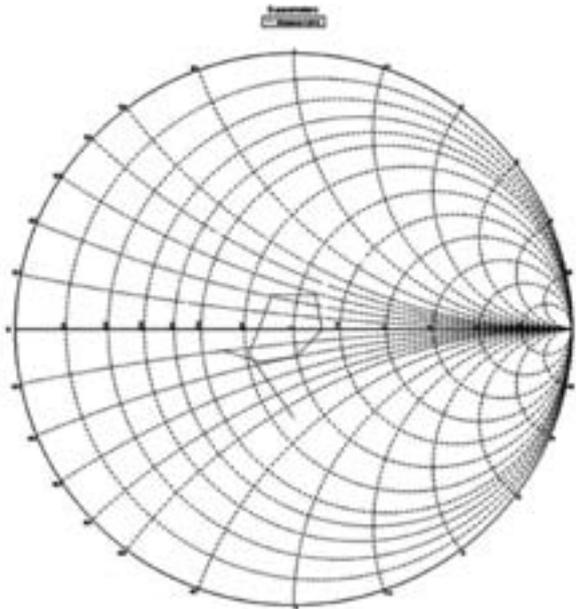
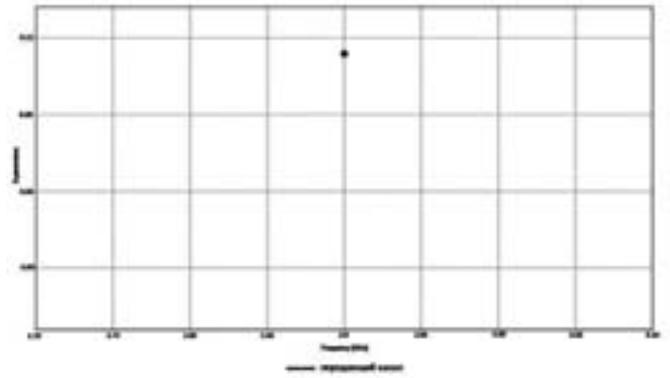


Рисунок 6.

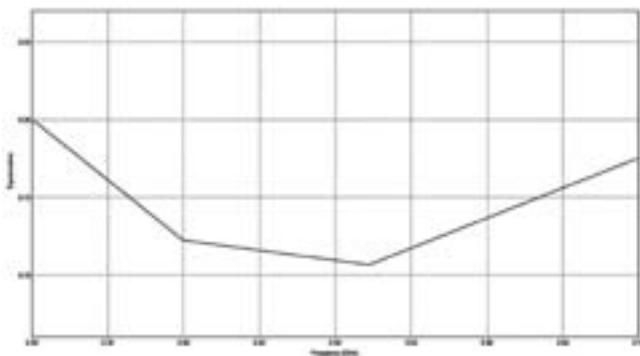
*Диаграмма Смита для разных положений штыря*



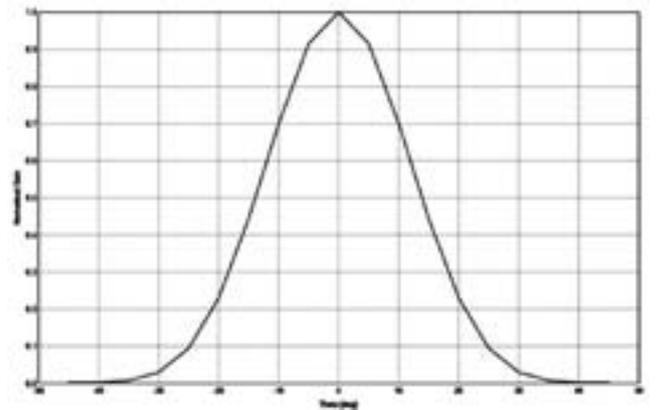
**Рисунок 7.**  
*Результат согласования*



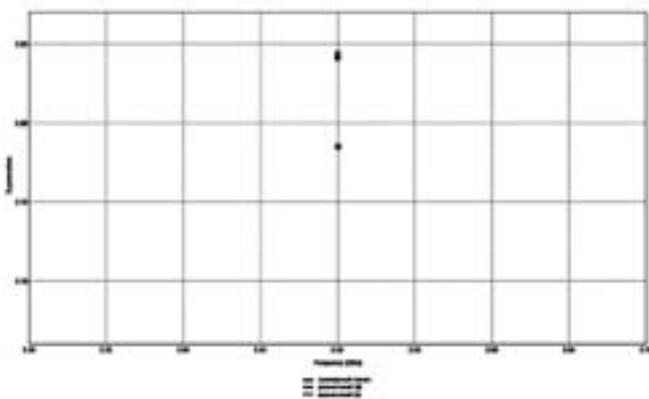
**Рисунок 10.**  
*Результат настройки передающего канала*



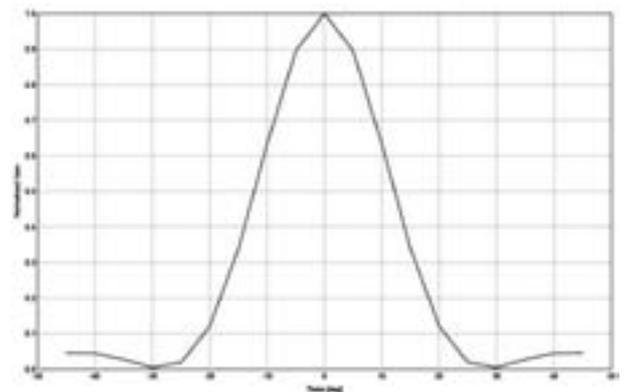
**Рисунок 8.**  
*Кoeffициент отражения*



**Рисунок 11.**  
*Диаграмма направленности суммарного канала в плоскости Н*



**Рисунок 9.**  
*Результат настройки приемного канала*



**Рисунок 12.**  
*Диаграмма направленности суммарного канала в плоскости Е*

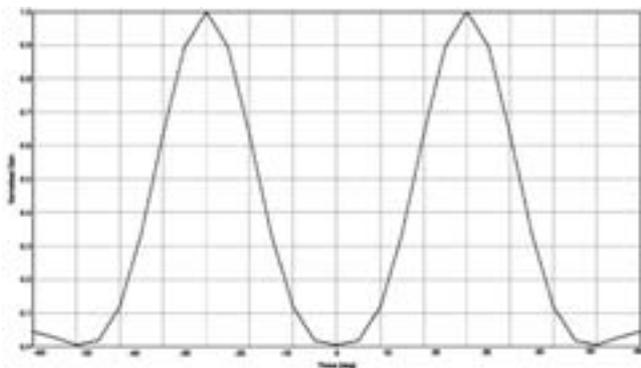


Рисунок 13.

Диаграмма направленности разностного канала в плоскости  $H$

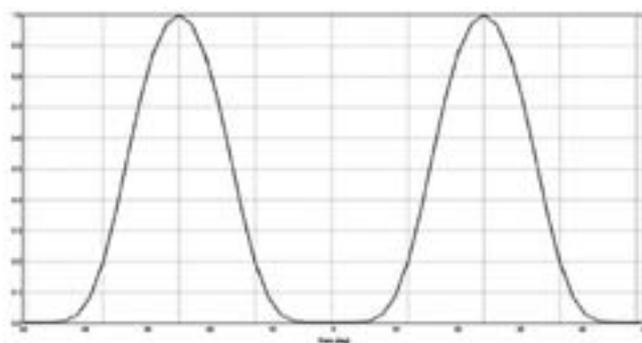


Рисунок 14.

Диаграмма направленности разностного канала в плоскости  $E$

Значение КСВ соответствует радиусу окружности, проведенной из единичной точки. Для наглядности приведем график модуля коэффициента отражения в декартовой системе (рис. 8).

$KCB = \frac{1+k}{1-k}$ , где  $k$  – коэффициент отражения

Наихудшее значение КСВ будет в максимуме коэффициента отражения, который равен 0.20.

$$KCB = \frac{1+k}{1-k} = \frac{1+0.20}{1-0.20} = 1.5$$

Аналогично была проведена настройка всего облучателя. Ввиду отсутствия нужной мощности ЭВМ была проведена настройка КСВ только на центральных частотах. Результаты настройки на центральной частоте приемного канала изображены на рис. 9 и передающего канала на рис. 10.

КСВ для суммарного приемного канала равно 1.47, для разностного  $\Delta\beta$  канала – 1.63, для разностного  $\Delta\epsilon$  канала – 1.65 и для передающего канала – 1.25.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемый облучатель по сравнению с прежним имеет другие входные и выходные частотные характеристики. Использование данной реализации этого устройства более востребовано при изменённых условиях эксплуатации.

### Список литературы:

1. А.З. Фрадин. «Антенны сверхвысоких частот». Издательство «Советское радио». Москва 1987г.
2. Д.И. Воскресенский. «Антенны и устройства СВЧ». Издательство «Советское радио». Москва 1972г.
3. А.М. Покрас, А.М. Сомов, Г.Г. Цуриков. «Антенны земных станций спутниковой связи». Издательство «Радио и связь». Москва 1985г.
4. Кюн Р. Микроволновые антенны (антенны сверхвысоких частот) / Перевод с немецкого В.И. Табарина и Э.В. Лабрецкого. Под ред. Проф. М.П. Долуханова изд. «Судостроение», 1967
5. А.В. Калинин, В.П. Мальцев, К.С. Щеглов. Исследование характеристик крупногабаритной зеркальной антенны корреляционным радиоастрономическим методом. Журнал «Радиотехника и электроника», том 52, 2007 г., с. 545-562.
6. И.Н. Корбанский. «Антенны». Издательство «Энергия». Москва 1983г.
7. Г.С. Головченко, В.Ф. Дубровин. «Измерение характеристик СВЧ-трактов». Учебное пособие. МИРЭА. Москва, 2004г.
8. А.М. Сомов, В.В. Старостин. «Антенно-фидерные устройства». – Учебное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011г.
9. О.П. Фролов, В.П. Вальд. «Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи» - М.: Горячая линия – Телеком, 2013г.
10. А.П. Трубицин. «Электромагнитные поля и безопасность жизнедеятельности».

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИ ПЕРЕДАЮЩИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СПРН В ИНТЕРЕСАХ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ПУШКИН К.А. – лейтенант, начальник лаборатории



Пушкин К.А.

*Рассмотрена актуальность автоматизации расчетов размеров СЗЗ и ЗОЗ, расчета необходимых характеристик.*

**Ключевые слова:** СПРН, ПРТО, экологическая безопасность, электромагнитная загрязненность, санитарно-защитная зона, Qt, архитектура программного обеспечения, модуль.

## DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE COMPLEX FOR CALCULATING AND FORECASTING ELECTROMAGNETIC PULSES (EMP) FROM THE EMITTING FACILITIES OF THE MISSILE ATTACK WARNING SYSTEMS FOR THE ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL SAFETY

PUSHKIN K.A.

**Annotation.** *The relevance of automation of calculation the dimensions of SPZ (Sanitary Protection Zone) and RBA (Restricted building Area) and calculation of required characteristics.*

**Keywords:** Missile Attack Warning System (MAWS), Transmitting Radio Engineering Objects (TREO), environmental safety, electromagnetic pollution, sanitary protection zone, Qt, software architecture, module.

В современной нестабильной геополитической обстановке в мире все больше внимания уделяется передовым образцам высокотехнологичного вооружения и военной техники. В этом плане система предупреждения о ракетном нападении (СПРН) является одной из основных систем, обеспечивающих безопасность нашей страны.

С развитием технологий, улучшаются ка-

чественные характеристики передающих радиотехнических объектов (ПРТО), а также происходит изменение концепции их строительства и поддержания жизнеобеспечения. Высокая степень заводской готовности (ВЗГ) и модульный принцип построения РЛС позволили отказаться от капитальных многоэтажных сооружений и возводить их в течение 12—18 месяцев (РЛС предыдущего

поколения вступали в строй через 5—9 лет).

Вся аппаратура станций в контейнерном исполнении доставляется с предприятий-изготовителей для последующей сборки на заранее забетонированные площадки.

Одной из основных проблем ПРТО является электромагнитная загрязненность окружающей среды. От правильной оценки электромагнитной обстановки зависит не только состояние окружающей среды, но и благополучие населения, находящегося в зоне действия объекта. Ни один объект Вооруженных сил Российской Федерации не вводится в эксплуатацию без медико-биологического и организационно-технического характера.

В целях защиты населения от воздействия ЭМП, создаваемых антеннами ПРТО, устанавливаются санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и зоны ограничения с учетом перспективного развития ПРТО и населенного пункта.

Границы СЗЗ определяются на высоте 2 м от поверхности земли по ПДУ. Зона ограничения представляет собой территорию, на внешних границах которой на высоте от поверхности земли более 2 м уровни ЭМП превышают ПДУ. Внешняя граница зоны ограничения определяется по максимальной высоте зданий перспективной застройки, на высоте верхнего этажа которых уровень ЭМП не превышает ПДУ.

Санитарно-защитная зона (СЗЗ) — специальная территория с особым режимом использования, которая устанавливается вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека. Размер СЗЗ обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами.

По своему функциональному назначению санитарно-защитная зона является защит-



*Рисунок 1.*

*РЛС высокой заводской готовности  
«Воронеж-ДМ»*

ным барьером, обеспечивающим уровень безопасности населения при эксплуатации объекта в штатном режиме. Размеры санитарно-защитной зоны и зоны ограничения застройки должны быть обоснованы расчётами и подтверждены результатами натурных измерений. Критерием для определения размера санитарно-защитной зоны и зоны ограничения застройки является отсутствие превышения на её внешней границе и за её пределами предельно допустимых уровней воздействия.

Установление размера санитарно-защитной зоны и зоны ограничения в местах размещения передающих радиотехнических объектов проводится в соответствии с действующими санитарными правилами и нормами по электромагнитным излучениям радиочастотного диапазона и методикам расчёта интенсивности электромагнитного излучения радиочастот (СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03, СанПиН 2.2.4.1191-03, СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03).

Прогнозирование позволит оценить электромагнитную обстановку на стадиях проектирования, строительства или реконструкции излучающих объектов с точки зрения выполнения действующих нормативов ПДУ, оценить перспективу развития объектов, ресурс энергетического потенциала технических средств, оптимизировать размещение и характеристики направленности антенно-фидерных устройств.



**Рисунок 2.**  
*Архитектура работы программного комплекса*

Расчетное прогнозирование, несмотря на сложность учета ряда реальных факторов размещения технических средств (местных переотражающих предметов и конструкций, а также рельефа местности), является более простым и обеспечивающим достаточную точность. При этом, расчетное прогнозирование позволяет более полно представить всю электромагнитную обстановку и может служить основанием для принятия решения и разработки предварительных мер защиты от воздействия электромагнитных полей на человека.

Для качественного и своевременного проведения работ по расчету уровней ЭМП для ПРТО СПРН целесообразно автоматизировать расчеты границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны ограниченной застройки (ЗОЗ). Автоматизация данных расчетов позволит оперативно определить размеры СЗЗ и ЗОЗ, рассчитать необходимые характеристики, а также визуализировать размещение технической позиции ПРТО с учетом рельефа местности в предполагаемой точке дислокации РЛС СПРН.

Перед реализацией программного комплекса, была выбрана интегрированная сре-

да разработки Qt Creator 4.5, а также была составлена примитивная архитектура работы комплекса (рис. 2).

Qt Creator (ранее известная под кодовым названием Greenhouse) — кроссплатформенная свободная IDE для разработки на C, C++ и QML. Разработана Trolltech (Digia) для работы с фреймворком Qt. Включает в себя графический интерфейс отладчика и визуальные средства разработки интерфейса как с использованием QtWidgets, так и QML.

Одной из характеристик, необходимых для расчета границ СЗЗ и ЗОЗ является плотность потока энергии (для сантиметровых и дециметровых длин волн) или напряженность (для метровых длин волн).

$$\text{ППЭ} = \frac{G \cdot P_{\text{ср}} \cdot p}{4\pi R^2} \cdot F_y^2$$

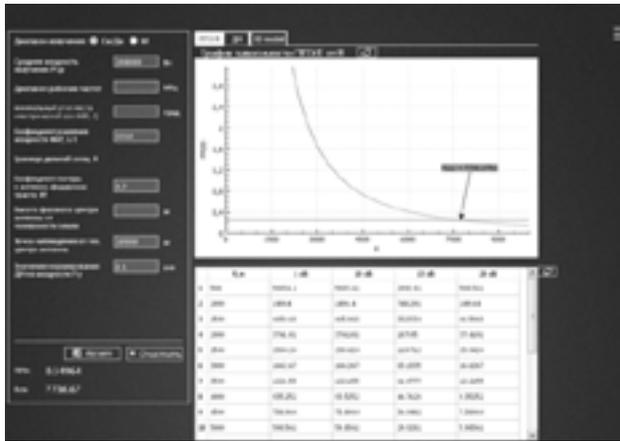
Где  $G$  – коэффициент усиления мощности ФАР;

$P_{\text{ср}}$  – Средняя мощность излучения, Вт;

$R$  – расстояние до рассматриваемой точки;

$F_y$  – Значение нормирования диаграммы направленности;

Изменяя значение расстояния рассматриваемой точки, имеется возможность полу-



**Рисунок 3.**

**Вид расчетного модуля программного комплекса**

чать различные значения напряженности и плотности потока энергии и вывести это в таблицу, а также построить график зависимости. Расчеты представлены на рис. 3.

Результатом работы станет прототип программного комплекса расчета и прогнозирования ЭМИ передающих радиотехнических

объектов СПРН в интересах экологической безопасности. Результаты расчетов представляются в виде графических или таблично-текстовых документов, являющихся составной частью перечня сведений, подлежащих включению в санитарно-эпидемиологическое заключение на ПРТО или раздела «Охрана окружающей среды» проекта размещения технического средства на ПРТО.

*Список литературы:*

1. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов». // Режим доступа: <http://www.vrednost.ru/2241383-03.php>, свободный.
2. Требования к размещению передающих радиотехнических объектов (ПРТО). // Режим доступа: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/38980>, свободный.

## РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

ЧЕТЫРИН И.В. – лейтенант, инженер-испытатель



Четырин И.В.

*Обеспечение безопасности критически важных объектов (КВО) России - объектов энергетики, транспортной инфраструктуры и других - в условиях возрастающей террористической и криминогенной активности является одной из приоритетных задач государства. Контроль и управление процессом создания и модернизации систем физической защиты (СФЗ) КВО связаны с обработкой большого объема информации, что затруднительно без использования средств автоматизации.*

**Ключевые слова:** безопасность, критически важные объекты, анализ информации.

## ANALYSIS OF THE INDICATORS OF THE INFORMATION SECURITY OF THE CRITICALLY IMPORTANT FACILITIES

CHETYRIN I.D.

**Annotation.** *Ensuring the security of critical important facilities (CIF) in Russia - energy facilities, transport infrastructure and others - in the context of increasing terrorist and criminal activity is one of the top priorities of the state. The control and management of the process of creating and upgrading the physical protection systems (PPS) of the CIF are related to the processing of a large amount of information, which is difficult without the use of automated systems.*

**Keywords:** Security, Critically Important Facilities, Information Analysis.

### ЗАЩИТА КВО

Применение средств автоматизации позволяет оперативно проводить оценку состояния защищенности КВО, а также обеспечивать рациональное вложение средств в совершенствование СФЗ.

Сложность указанной оценки наиболее ярко проявляется для территориально распределенных КВО отрасли, когда сбор информации затруднен как в силу удаленности объектов, так и в силу конфиденциальности передаваемой дистанционно информации, необходимой для контроля и управления.

Данная задача была решена в Госкорпорации (ГК) «Росатом», имеющей в своем составе более чем 70 ядерных и радиационно опасных объектов (ЯРОО).

Для обеспечения эффективного контроля состояния СФЗ ЯРОО ГК «Росатом» в 2007 г. ФГУП СНПО «Элерон» была разработана информационная система оценки состояния СФЗ (далее ИСОС), включающая в себя:

- программный комплекс (ПК) «Контроль-Ц» - для оценки и планирования работ по всем СФЗ ЯРОО ГК «Росатом», формирования отчетов для ведомственного контроля. Устанавливается в ГК «Росатом» и ФГУП СНПО «Элерон»;
- ПК «Контроль-О» - для оценки состояния СФЗ ЯРОО. Устанавливается в службе безопасности ЯРОО. В настоящее время ПК «Контроль-О» работает на 6 ядерных объектах;
- комплект электронных анкет (КЭА) (13 анкет) - для объектов без ПК «Контроль-О» (65 ЯРОО).

Одной из основных задач контроля является анализ полноты и качества предоставляемой информации (особенно финансовой), выполнения всех работ и целевого использования средств.

Задачи контроля решаются: оценкой соответствия имеющихся количественных или качественных значений планируемому или требуемому значениям по конкретным ЯРОО, конкретным задачам;

- контролем своевременности, качества и объема выполнения работы;

- расчетом суммарного и частных отклонений исследуемых величин;

- контролем своевременности и достоверности поступления необходимой информации [5].

Для решения данных задач используются методы попарного сравнения, экспертных оценок.

Обобщенная концепция анализа состоит в выявлении узких (слабых) мест, тенденций в статике и динамике процесса совершенствования СФЗ и в формировании предложений на их основе по коррекции управляющих воздействий.

Задачи анализа решаются:

- определением единичных критических значений - поиск минимальных и максимальных значений (например, определение наилучших и наихудших ЯРОО по одному показателю – обновленность ТСФЗ);

- кластеризацией - разбиением на группы (кластеры) исследуемых объектов по одному или по нескольким признакам (например, по состоянию КИТСФЗ - обновленность, наличие ЗИП, достаточность персонала для обслуживания ТСФЗ);

- сравнительным анализом элементов кластеров, на основе которого определяются объекты, являющиеся по нескольким признакам наилучшими или наихудшими, а также происходит группировка ЯРОО по одному (несколько наихудших объектов) и более признакам;

- однофакторным анализом - оценкой степени влияния одного фактора на результат измерений;

- корреляционным анализом - оценкой сте-

пени влияния одного измеряемого показателя на другой;

- прогнозным анализом - оценкой объемов финансирования на следующий год, исходя из динамики роста затрат, планируемых работ, в среднем выделяемых средств от планируемых (требуемых) объемов, в том числе по видам источников финансирования, тенденций развития отрасли;

- анализом изменения показателей во времени;

- причинно-следственным анализом выявляются причины возникновения тех или иных недостатков [5].

Оценка состояния защищенности КВО, согласно методике МЧС[2], осуществляется методом внутригруппового ранжирования, частным случаем которого является метод анализа иерархий. При использовании данного метода формируется матрица попарных сравнений мероприятий защищенности объекта. Показатели этой матрицы формируются по данным опроса должностных лиц и специалистов гражданской обороны и РСЧС.

В соответствии с результатами проведенного экспертного опроса специалистами определяются значения весовых показателей реализации мероприятий повышения защищенности КВО по группам:

$$W_I=0,3591, W_{II}=0,125, W_{III}=0,1361, W_{IV}=0,1963, W_V=0,1133, W_{VI}=0,0702$$

Весовые показатели реализации соответствующего мероприятия для объектов 1 – 4 классов ( $K_{ij} \dots v_{ij}$ ) определяются специалистами на местах по результатам экспертного опроса.

При проведении расчетов по методике оценки защищенности объектов каждый показатель экспертной оценки выполнения (реализации) мероприятия в рамках каждой группы мероприятий должен определяться в диапазоне от 0 до 1,0 при этом в рамках группы мероприятий показатель суммы степеней выполнения каждого из запланированных мероприятий оценивается в диапазоне  $\{0, N\}$ , где  $N$  – количество таких мероприятий в группе: I группа –  $\{0,6\}$ ; II группа –  $\{0,3\}$ ; III группа –  $\{0,4\}$ ; IV группа –  $\{0,4\}$ ; V группа –  $\{0,4\}$ ; VI группа –  $\{0,3\}$ .

Мероприятия, не планируемые для проведения на данном объекте, остаются в форме с незаполненными ячейками (пустой строкой) и при расчетах не включаются в N.

Показатель реализации мероприятия с учетом степени его реализации ( $L_{ij} \dots v_{ij}$ ) определяется как произведение соответствующего весового показателя реализации мероприятия для объектов 1 – 4 классов ( $K_{ij} \dots v_{ij}$ ) на показатель степени реализации мероприятий ( $R_{ij} \dots v_{ij}$ ).

$$(L_{ij} \dots v_{ij}) = (K_{ij} \dots v_{ij}) \times (R_{ij} \dots v_{ij}).$$

Показатель реализации мероприятия с учетом степени его реализации и весового показателя группы мероприятий ( $P_{ij} \dots v_{ij}$ ) определяется как произведение показателя реализации мероприятия с учетом степени его реализации ( $L_{ij} \dots v_{ij}$ ) на соответствующий весовой показатель реализации мероприятия повышения защищенности КВО по группам мероприятий ( $M_{ij} \dots v_{ij}$ ).

$$(P_{ij} \dots v_{ij}) = (L_{ij} \dots v_{ij}) \times (M_{ij} \dots v_{ij}).$$

Результат оценки реализации мероприятий по обеспечению защищенности КВО определяется как сумма показателей реализации мероприятий с учетом степени его реализации и весового показателя группы мероприятий ( $P_{ij} \dots v_{ij}$ ) [3].

$$\sum (P_{ij} \dots P_{vij}) \leq 1.$$

Для оценки состояния защищенности КВО принята оценочная шкала с помощью которой можно оценить уровень защищенности объекта по полученному результату расчета. По шкале защищенности объекта максимально возможная степень защищенности равна 1,0 и достигается при полной реализации рационального спланированных мероприятий.

Полученная в результате проведения расчетов величина – оценка состояния защищенности КВО – служит обоснованием для дальнейшего планирования разработки и реализации комплекса мероприятий, позволяющего достичь требуемого (достаточного и необходимого) уровня защищенности КВО ( $0,7 \leq 1,0$ ).

Проще говоря, вычисления производятся следующим образом: построчно данные из столбцов «Весовой показатель реализации мероприятий повышения защищенности

КВО по группам мероприятий», «Степень реализации мероприятия» и «Весовой показатель реализации мероприятий для объектов класса» перемножаются, результат записывается в столбец «Показатель реализации мероприятий с учетом степени его реализации и весового показателя группы мероприятий», далее складываются все значения этого столбца - это и будет показатель защищенности объекта [3].

#### АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Определить защищенность объекта можно и с помощью динамического программирования. Данилова и Толстых предлагают использовать диаграммы Исикавы и Парето [3] для проведения анализа показателей безопасности объекта.

#### Оценка показателей защиты информации с применением диаграммы Парето

Оценка показателей защиты информации может быть сформирована на основании выявленной аудиторской группой степени выполнения требований посредством экспертного оценивания. Положим, что в результате опроса имеется:  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_l\}$  – множество классов и семейств функциональных показателей качества процесса защиты информации;  $m = \{m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_l\}$  – множество функциональных требований обеспечения уровня защиты в классе  $M_i$ ;  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_k\}$  – множество причин, из-за которых не выполняются те или иные безопасности. По полученным данным можно построить причинно-следственную диаграмму Исикавы для выявления и ранжирования (распределения по степени важности) имеющихся причинно-следственных связей (рис. 1).

Результаты причинно-следственных связей используются для построения кумулятивной кривой диаграммы Парето, позволяющей дать ответ на вопрос: «Какие причины необходимо устранить для достижения некоторой доли желаемого результата?» [3].

Диаграмма Парето является графическим отображением правила Парето. В менедж-

жменте качества применение этого правила показывает, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. Коротко правило Парето формулируется как 80 на 20. Например, если применить это правило по отношению к дефектам, то окажется, что 80 процентов дефектов возникает из-за 20 процентов причин.

Используется диаграмма Парето при выявлении наиболее значимых и существенных факторов, влияющих на возникновение несоответствий или брака. Это дает возможность установить приоритет действиям, необходимым для решения проблемы.

Кроме того, диаграмма Парето и правило Парето позволяют отделить важные факторы от малозначимых и несущественных.

Строится диаграмма Парето в следующем порядке:

1. Определяется проблема, которую необходимо решить (например, дефектные изделия, стоимость потерь от брака и т.п.) и выбирается временной интервал для изучения проблемы.

2. Выбирается тип данных (фактор) для анализа, который наиболее полно сможет охарактеризовать проблему (например, дефекты, их локализация, объем потерь, затраты и пр.). Выбранный тип данных должен быть разбит на подтипы. Например, если в качестве типа данных выбраны дефекты, то подтипом будут являться виды дефектов – деформация, царапины, трещины и пр.

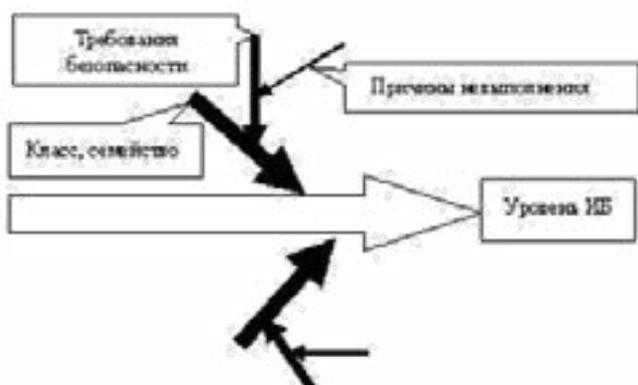


Рисунок 1.

*Причинно-следственная диаграмма Исикавы для выявления и ранжирования*

3. Определяется единица измерений, соответствующая типу данных (например, количество дефектов, их частота, процент затрат и т.п.).

4. Собираются статистические данные, и выполняется их систематизация. Для сбора и регистрации данных можно применять другие инструменты качества, например контрольный листок. Систематизацию статистических данных лучше представить в виде таблицы.

5. Выполняется подсчет и упорядочивание данных по убыванию.

6. При необходимости назначаются веса для каждого из подтипов данных. Установление весов может оказать существенное влияние на результат, который покажет диаграмма Парето. Веса перемножаются на подсчитанные значения по каждому из подтипов данных, что приводит к изменению соотношения их значимости.

7. Строится столбчатая диаграмма, на которой отмечаются подтипы данных и их величина. В прямоугольной системе координат по горизонтали откладываются равные отрезки, соответствующие подтипам данных, а по вертикали отмечается величина этих данных в порядке по убыванию.

8. Вычисляется и отображается на диаграмме линия суммарных значений (например, накопленных процентов).

9. Выполняется анализ полученных результатов для разработки необходимых действий по решению проблемы.

Фактически кумулятивная линия диаграммы Парето (рис. 2) указывает эмпирическую функцию распределения, а ступенчатая функция определяет эмпирическую плотность вероятности. Следует обратить внимание, что эмпирическая плотность вероятности по способу построения всегда будет похожей на плотности стандартных законов распределения: нормального и экспоненциального.

То есть гистограмма с определенной точностью аппроксимируется или половиной гауссианы  $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2\sigma^2}$  или экспонентой  $\lambda e^{-\lambda}$ .

Необходимо, чтобы эмпирические данные были одной размерности со значениями

функции нормального распределения. Так как интересующей частью является вторая половина нормального распределения, следует рассматривать интеграл

$$\int_0^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} dx = 1.$$

Тогда плотность нормального распределения будет

$$\frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2}$$

Следующий этап - методом наименьших квадратов (с помощью критерия  $\chi^2$ ) выбрать тот закон, который наиболее точно характеризует полученную гистограмму. В этом случае системы оценивается  $K$  раз (кол-во эмпирических значений для каждого параметра). Причем чем больше будет  $K$ , тем более обоснованной будет оценка.

Рассмотрим значения ступенчатой функции  $x_1, \dots, x_K$  и определим наилучшее значения  $\sigma$  и  $\lambda$ , исходя из условий минимума функционалов:

$$J(\sigma) = \sum_{i=1}^K (x_i - \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}})^2, \quad I(\lambda) = \sum_{i=1}^K (x_i - \lambda e^{-\lambda x_i})^2$$

Искомые значения находятся методом дихотомии.

$$\frac{\partial J}{\partial \sigma} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial \lambda} = 0$$

Выбирая малый шаг по параметру, увеличиваем  $\sigma$  или  $\lambda$  до тех пор, пока монотонное убывание значений функционалов не сменится на монотонное возрастание. Далее, разбивая отрезок, содержащий корень, добиваемся требуемой точности и, проведя сравнение результатов, уточняем закон, которому подчиняется рассматриваемая диаграмма. Для этого необходимо подсчитать значение

$$\chi^2 = \sum \frac{(\mathcal{E} - T)^2}{T},$$

где  $\mathcal{E}$  – полученное эмпирическое значение;  $T$  – теоретическое значение (нормальное или экспоненциальное).

Для проверки гипотезы о том, что эмпирическая функция является нормальной функцией, необходимо вычислить  $\chi^2$  при

$$T = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} \quad \text{и} \quad T = \lambda e^{-\lambda x}$$

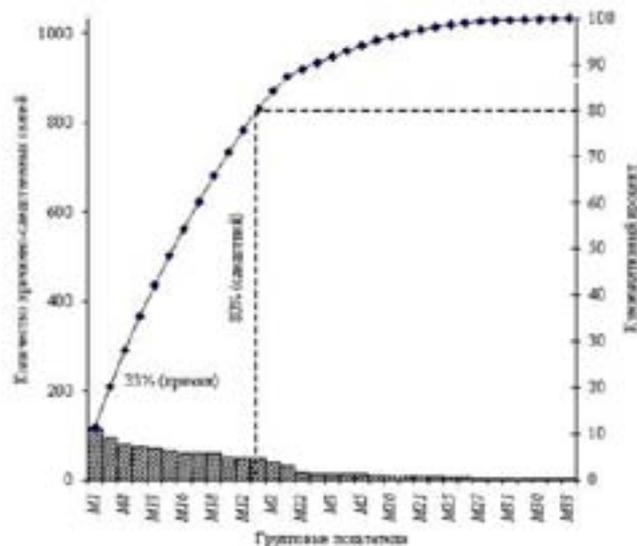


Рисунок 2.

### Кумулятивная линия диаграммы Парето

Если приведенную диаграмму Парето по полученным данным наиболее точно аппроксимирует нормальный закон распределения, то это означает, что на рассматриваемые классы  $M$  адаптивно влияет множество различных факторов, причем влияние каждого из них вносит малый вклад в отклонение от нормального распределения, а их воздействия почти независимы.

При полученном распределении следование принципу Парето или «Правилу 20/80», при котором 20% причин порождает 80% последствий (в нашем случае анализ показал наличие 33% влияющих причин), неприемлемо ввиду независимости этих причин, и, следовательно, для повышения уровня показателей защищенности необходимо проводить корректирующие мероприятия по всем классам и семействам функциональных показателей качества процесса защиты информации. Если же результаты подчиняются экспоненциальному закону распределения, то согласно принципу Парето для повышения уровня защищенности на 80% достаточно уделить основное внимание первым 20% показателей.

Данилова и Толстых также приводят метод динамического программирования для планирования проведения работ по повышению уровня защищенности объекта.

Пусть для выполнения набора работ  $W_k$  по проведению корректирующих мероприятий

для повышения уровней защищенности выделенных классов и семейств функциональных показателей качества процесса защиты  $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5$  отведено  $T_{р.д.} = 100$  рабочих дней.

Из рис. 3 видно, что любой путь в сети из начальной вершины 0 в одну из конечных вершин соответствует некоторому набору работ. И наоборот, любому набору работ с общим временем выполнения не более 100 рабочих дней однозначно соответствует путь в сети, соединяющей начальную вершину с одной из конечных. Значение координаты по второй оси равно суммарному времени выполнения корректирующих мероприятий. Если принять длины горизонтальных дуг равными, а длины наклонных равными эффекту  $u_i$  для соответствующей работы, то длина пути, соединяющего начальную вершину с одной из конечных, будет равна суммарному эффекту соответствующего набора корректирующих мероприятий. Таким образом, задача сводится к определению пути, имеющему максимальную длину. На рисунке путь максимальной длины выделен жирными дугами, а суммарный эффект  $U$  равен 140.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день в России не обеспечивается должной и полноценной защиты инфраструктуры КВО. Главная проблема в данном случае заключается в том, что потенциальный

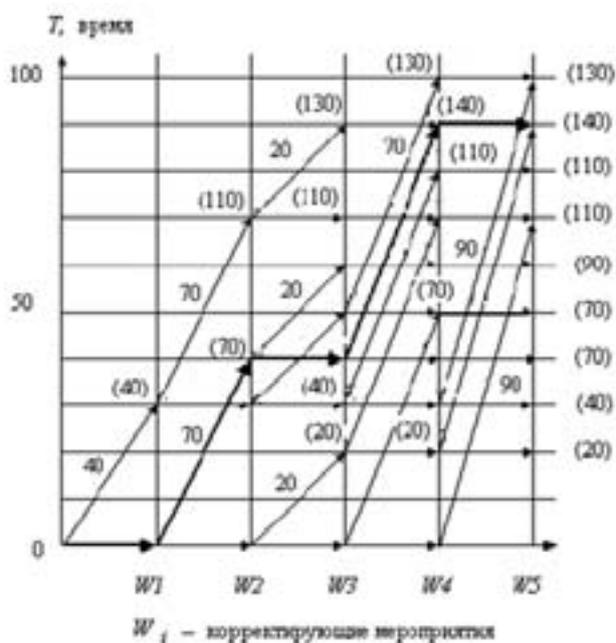


Рисунок 3.

Схема проведения работ по повышению уровня защищенности объекта

для объектов КВО злоумышленник, прежде всего, обладает высоким профессионализмом и использует целевые атаки, а наработанной практики противодействия таким атакам в нашей стране практически нет. Именно поэтому для многих КВО их АСУ ТП проектируются изолированно от внешних систем.

Однако, в перспективе, практически все российские ИБ-интеграторы испытывают большой интерес к защите инфраструктур КВО, наращивают компетенции в этой области, изучают рынок подходящих решений. Разработчики средств борьбы с вредоносным кодом, как и вендоры сканеров безопасности, работают над выявлением уязвимостей в специфических элементах инфраструктуры КВО, пробуют свои силы в аудите их ИБ. На рынке появились и быстрыми темпами совершенствуются новые системы обеспечения ИБ инфраструктур КВО.

### Список литературы:

1. Васильев, В. Информационная безопасность критически важных объектов / В. Васильев // PC Week Review: ИТ-безопасность. - №9, 2013.
  2. Воскобоев, В.Ф. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособ. для вузов МЧС России / В. Ф. Воскобоев. - М. : Альянс: Путь, 2008. Ч. 1: Надежность технических систем. - 199 с.
  3. Данилова, О.Т. Анализ системы защиты информации с применением инструментов / О. Т. Данилова, Е. Н. Толстых // Доклады ТУСУРа. - № 1 (25), часть 2, июнь 2012.
  4. Евдокимов, В.И. Научно-информационный поиск в сфере безопасности жизнедеятельности: учеб. пособ. /В. И Евдокимов. - СПб.: Политехника, 2008. -184 с.
  5. Козлитин, А.М. Теория и методы анализа риска сложных технических систем / А. М. Козлитин. – Саратов : СГУ, 2009. - 199 с.
  6. Методические рекомендации по разработке планов защищенности критически важных объектов территорий субъектов Российской Федерации и муниципальных образований от 28.12.2011 г.
- Электронные ресурсы:
- Менеджмент качества. – Режим доступа: [http://www.kpms.ru/Implement/Qms\\_Pareto\\_Chart.htm](http://www.kpms.ru/Implement/Qms_Pareto_Chart.htm)
- HelpStat. - Режим доступа : <http://helpstat.ru>
- Информационная безопасность по-русски. - Режим доступа: <http://www.tsarev.biz/informacionnaya-bezopasnost/normativnaya-baza-zashhity kriticheski-vazhnyx-obektov-kvo/>

## ПРОВЕДЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНООСНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ПОВОРОТНОГО СТОЛА AUTRONIC 1120S

ШУВАЕВ И.Н. – оператор 3-й Научной роты КВ ВКС



Шуваев И.Н.

*В статье описана возможность проведения испытаний Бесплатформенной курсовертикали и блока акселерометров на одноосном поворотном стенде Acutronic 1120S с использованием собственного разработанного программного обеспечения, удовлетворяющего требованиям испытаний, основанным на требованиях единых норм летной годности гражданских транспортных самолетов (ЕНЛГ-С) и Technical Standart Order (TSO C-4c).*

**Ключевые слова:** поворотный стол, испытания, точностные характеристики, курсовертикаль, акселерометр.

## THE DYNAMIC STATIC TESTS TO DETERMINE THE ACCURACY CHARACTERISTICS OF DEVICES USING SINGLE AXIS PRECISION ROTARY TABLE AUTRONIC 1120S

SHUVAEV I.N.

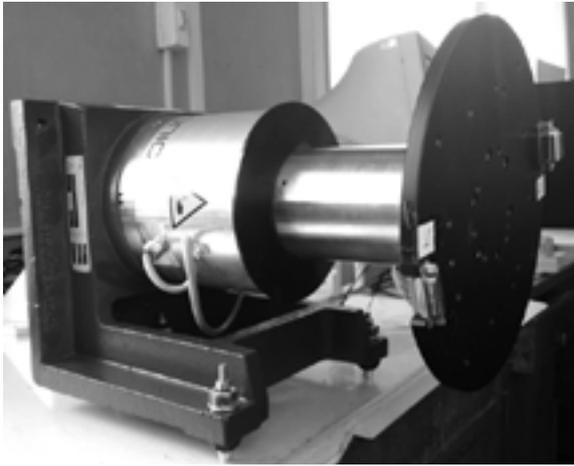
**Annotation.** *The article describes the possible tests of the Strapdown attitude and heading reference system and unit of accelerometers uniaxial swivel stand Acutronic 1120S using own developed software that meets the requirements of the tests based on the requirements of the uniform standards of airworthiness civil transport aircraft (ENLG-S) and Technical standard Order (TSO C-4c).*

**Keywords:** Turn-around machine, tilt stand, Testing, Kursovertikal, Precision characteristics, strapdown attitude-heading reference sys, the Accelerometer.

На сегодняшний день в задачи предприятий авиационной отрасли, занимающихся созданием высокоточных приборов, входит не только разработка и сборка изделия, но и проверка его работоспособности путем проведения различных испытаний. Эти испытания необходимы для проверки выпускаемого изделия на соответствие техническому заданию (ТЗ).

Для проверки точностных характеристик выпускаемых приборов и датчиков ориентации распространено применение поворотных стендов. С их помощью проводятся полунатурные или имитационные испытания.

Для создания поворотных стендов принято использовать поворотные столы высокой точности. На данный момент наиболее известными фирмами, производящими пово-



**Рисунок 1.**  
**Поворотный стол ACUTRONIC AC1120S**

ротные столы с прецизионной точностью, являются Actidyn и Acutronic. Эти фирмы являются лидерами рынка поворотных столов и стандов. Их оборудование используется для работы многими Институтами и предприятиями. Например, поворотные станды фирмы Actidyn используются для проведения научных работ и обучения студентов в лаборатории НИУ МАИ, а поворотные станды Acutronic применяются в Раменском приборостроительном конструкторском бюро.

В данной работе в качестве испытуемых приборов будут использоваться малогабаритные микромеханические приборы используемые для нужд авиации и космонавтики. Бесплатформенная курсоверткаль и блок акселерометров.



**Рисунок 2.**  
**Модуль управления ACUTRONIC AC1120S**

Пункты ТЗ, связанные с проверкой бесплатформенной курсоверткаль сформулированы следующим образом:

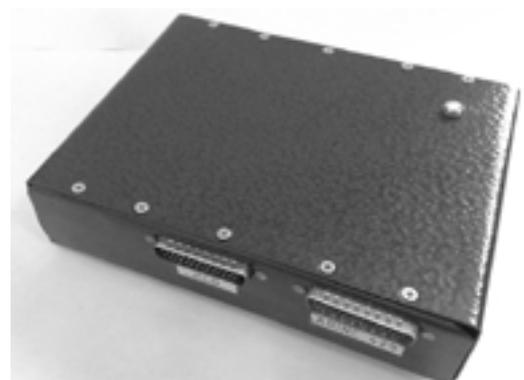
Погрешности прибора по определению углов крена и тангажа непосредственно после качания с углами  $\pm 5 \dots \pm 7,5$  градусов и частотой 10...15 колебаний/мин в течение времени не менее 5 мин в нормальных условиях не должны превышать  $\pm 1$  градус;

После двух последовательных полных оборотов прибора по крену (на 360 градусов и обратно) со скоростью  $|360|$  град/сек погрешность прибора не должна превышать  $\pm 4$  градуса. После двух последовательных полных оборотов прибора по тангажу (на 360 градусов и обратно) со скоростью  $|18|$  град/сек погрешность прибора по тангажу не должна превышать  $\pm 4$  градуса.

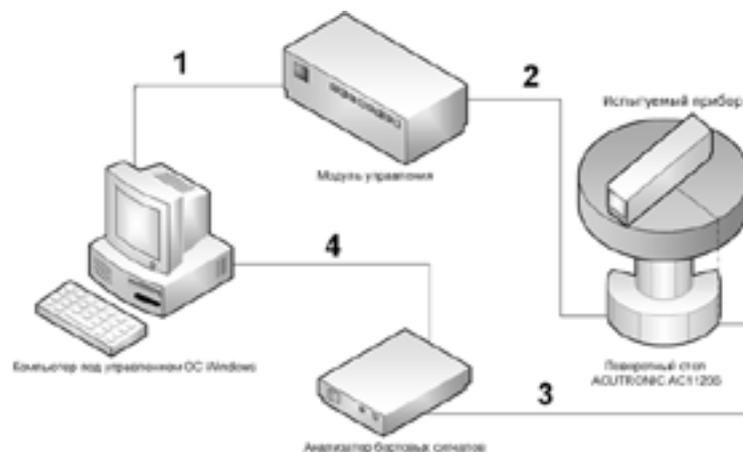
ТЗ на проверку блока акселерометров в составе включает себя следующий пункт:

Обеспечить перегрузку блока акселерометров от  $-1g$  до  $3g$ . Погрешность не должна превышать  $\pm 0.1g$ .

Для обеспечения испытаний была поставлена задача: создать поворотный стенд на базе поворотного стола фирмы ACUTRONIC серии AC1120S и разработать программно-математическое обеспечение (ПМО), основанное на требованиях единых норм летной годности гражданских транспортных самолетов (ЕНЛГ-С) и Technical Standart Order (TSO C-4c), для проведения имитационных



**Рисунок 3.**  
**Анализатор бортовых сигналов**



**Рисунок 4.**  
*Структурная схема поворотного стенда*

работ и проверки точностных характеристик бесплатформенной курсовертикали и блока акселерометров.

Созданный поворотный стенд имеет в своем составе поворотный стол (рис. 1), модуль управления поворотным столом (рис. 2), компьютер под управлением ОС Windows с COM-портом и анализатор бортовых сигналов (рис. 3).

На рис. 4 представлена структурная схема связи между вышеописанными компонентами стенда:

1. Связь компьютера с модулем управления AC1120S через интерфейсный кабель RS-232 (COM-порт) позволяет отправлять управляющие команды и принимать данные с поворотного стола;

2. Модуль управления AC1120S формирует сигналы управления двигателем поворотного стола посредством интерфейсного кабеля "Encoder" и снимает данные о его текущем положении;

3. При помощи интерфейсного кабеля ARINC429 осуществляется подключение тестируемого прибора, установленного на поворотном столе, к анализатору бортовых сигналов;

4. Анализатор бортовых сигналов дешифрирует кодовые последовательности стандарта ARINC429 и посредством USB-интерфейса передает данные с тестируемого прибора на компьютер.

Из описания структурной схемы поворот-

ного стенда следует, что на одном компьютере присутствуют управляющие сигналы, сигналы положения поворотного стола и сигналы с тестируемого прибора.

При начале работы с поворотным столом ACUTRONIC, используя штатное программное обеспечение, не удалось обеспечить выполнения всех пунктов ТЗ на приборы.

Были выявлены следующие типы недостатков:

- часто обрывается часть между модулем управления и ПК, причем проблема не в физической линии, а в недоработке ПО;
- интерфейс программы неудобен в использовании, сложен для освоения и восприятия.

В связи с этим была поставлена задача разработать свое узкоспециализированное программно-математическое обеспечение (ПМО) на основе документа «ASCII Object Reference SERVOSTAR™ 300», описывающего команды управления поворотным столом.

Для разработки ПМО была выбрана среда Delphi 7, где на языке Pascal был написан ряд тестовых программ с использованием оптимального набора команд задания необходимых видов движения.

Также во время разработки ПМО были выявлены некоторые сложности управления поворотным столом:

Существует неконтролируемая задержка по времени отработки пользовательской команды модулем управления (перемещение

на заданный угол, достижение установленной величины скорости или ускорения), однако команды для снятия показаний модуль управления обрабатывает с задержкой менее 15 мс;

Модуль управления обладает собственными алгоритмами для ускорения и торможения поворотного стола. Вероятно, данное ограничение введено искусственно, чтобы сохранить эксплуатационные свойства, предотвратить ухудшение метрологических параметров и выход из строя электродвигателя поворотного стола.

Перечисленное выше не позволяет создать программу, в которой пользователь сможет управлять поворотным столом, в режиме реального времени задавая скорости и ускорения при определенных положениях поворотного стола.

Решением этой проблемы стало использование внутренних алгоритмов модуля управления. Они позволяют произвести предустановку управляющих команд для создания необходимого вида движения поворотного стола. При этом дальнейшее участие пользователя в контроле и поддержании необходимого вида движения не требуется, но ему предоставляется возможность в режиме реального времени считывать данные о положении поворотного стола и скорости его вращения.

Разработанный алгоритм работы ПМО для Бесплатформенной курсовертикали представляет собой следующее:

- проверка соединения с поворотным столом;
- проверка соединения с тестируемым прибором через анализатор бортовых сигналов;
- отправка полного набора управляющих команд, состоящего из нескольких пакетов, в модуль управления поворотным столом;
- запуск пакета команд;
- циклическое считывание данных об угловом положении с поворотного стола и прибора и их сравнение в течение заданного времени;
- повторение п.4 и п.5 при смене параметров движения.

Внешний вид интерфейса программ показан на рис. 5 и рис. 6.

Первоначально пользователю доступна кнопка «Установить связь со стендовым оборудованием». В случае невозможности установки связи с оборудованием кнопки формы не активируются. На кнопке вместо надписи «Установить связь со стендовым оборудованием» появится сообщение об ошибке.

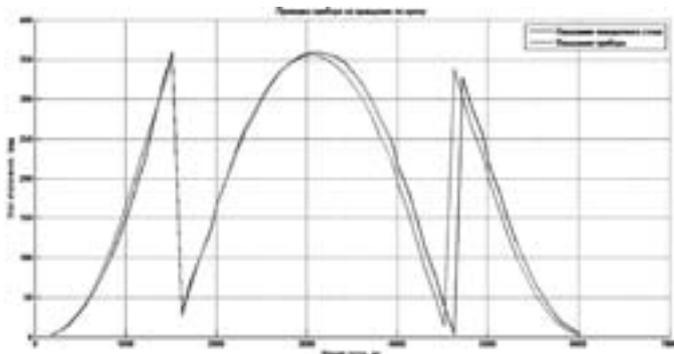
В случае успешного подключения стенда и анализатора бортовых сигналов активируются кнопки «Начать тест» и «Отключить стол», становится доступной задача параметров теста.



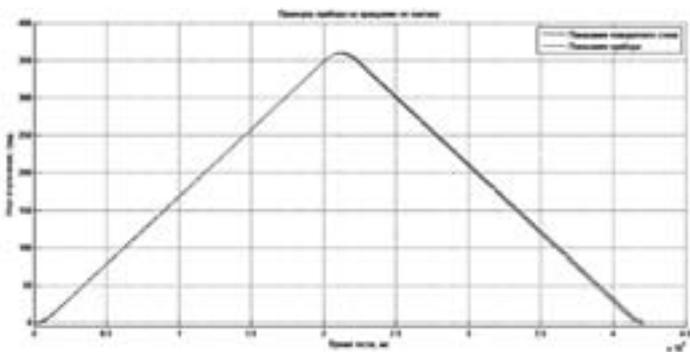
**Рисунок 5.**  
**Рабочее окно программы проверки прибора на колебательные движения**



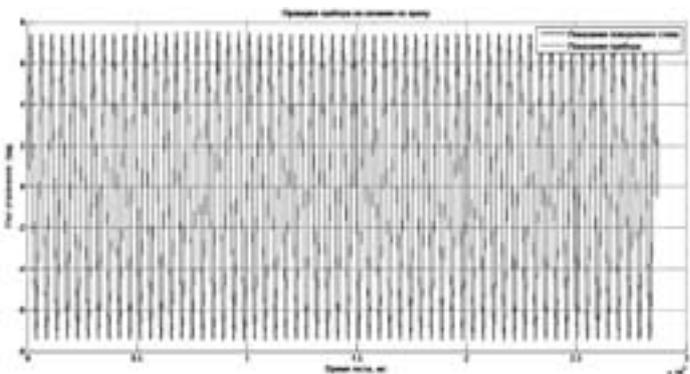
**Рисунок 6.**  
**Рабочее окно программы проверки прибора на вращательные движения**



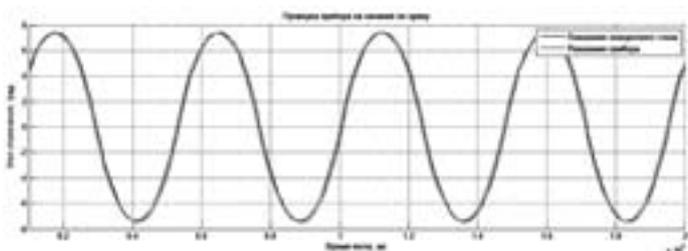
**Рисунок 7.**  
**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на вращение по крену**



**Рисунок 8.**  
**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на вращение по тангажу**



**Рисунок 9.**  
**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на колебательные движения по крену**



**Рисунок 10.**  
**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на колебательные движения по крену в временном интервале от 1 до 20 секунд**

стендовым оборудованием» появится надпись «Оборудование успешно активировано» и кнопка становится неактивной.

При нажатии кнопки «Начать тест» она становится неактивной, происходит загрузка управляющих команд непосредственно в модуль управления. На кнопке отображается таймер обратного отсчета до момента окончания теста. В момент окончания теста в окно «Погрешность прибора» выводится значение текущей погрешности.

Если погрешность превышает допустимые нормы, она окрасится в красный цвет. Кнопки «Начать тест» снова становятся активными, после этого возможно повторение теста.

На рис. 7, рис. 8, рис. 9, рис. 10, рис. 11 и рис. 12 представлены результаты тестирования Бесплатформенной курсовертикали.

Для удовлетворения требованию ТЗ в части не превышения погрешности прибора  $\pm 4$  градуса после двух последовательных полных оборотов прибора по крену (на 360 градусов и обратно) со скоростью  $|360|$  град/сек предложен следующий алгоритм вращения поворотного стола:

- плавный разгон в течение 1 сек до скорости 360 град/сек;
- выдерживание в течение 1 сек постоянной скорости 360 град/сек;
- плавное торможение в течение 1 сек до остановки поворотного стола;
- плавный разгон в обратную сторону в течение 1 сек до скорости 360 град/сек;
- выдерживание в течение 1 сек постоянной скорости 360 град/сек;
- плавное торможение в течение 1 сек до полной остановки поворотного стола.

В момент остановки поворотного стола снимаются показания об угловом положении с прибора и поворотного стола. Эти показания сравниваются и вычисляется погрешность.

Из графика (рис. 7) видно, что в процессе вращения в приборе накапливается погрешность. После полной остановки поворотного стола погрешность составляет 0,372 градуса, что не превышает заданной по ТЗ.

В соответствии с ТЗ после двух последовательных полных оборотов прибора по

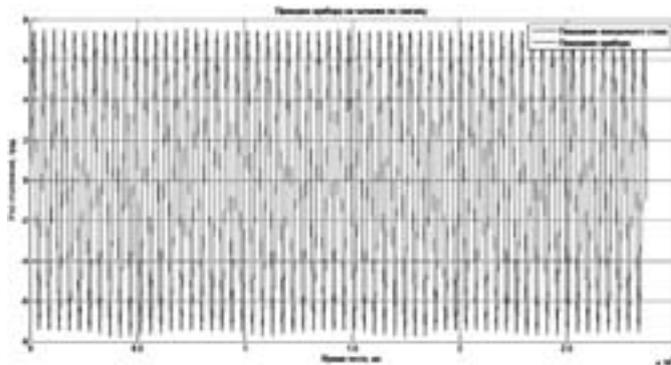


Рисунок 11.

**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на колебательные движения по тангажу**

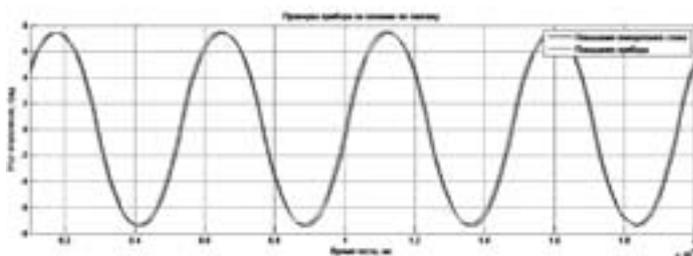


Рисунок 12.

**Результаты проверки Бесплатформенной курсовертикали на колебательные движения по тангажу в временном интервале от 1 до 20 секунд**

тангажу (на 360 градусов и обратно) со скоростью  $|18|$  град/сек погрешность прибора по тангажу не должна превышать  $\pm 4$  градуса. Для проверки этого пункта реализован следующий алгоритм:

- плавный разгон в течение 1 сек до скорости 18 град/сек;
- выдерживание в течение 20 сек постоянной скорости 18 град/сек;
- плавное торможение в течение 1 сек до остановки поворотного стола;
- плавный разгон в обратную сторону в течение 1 сек до скорости 18 град/сек;
- выдерживание в течение 20 сек постоянной скорости 18 град/сек;
- плавное торможение в течение 1 сек до полной остановки поворотного стола.

После полной остановки поворотного стола произведен замер расхождения между показаниями поворотного стола и прибора (рис. 8), который составил 2,518 градуса, что не превышает величины, заданной в ТЗ.

В основе алгоритма для проверки погрешности прибора по определению углов крена и тангажа при качании (рис. 9-10), рис. 11-12)

лежит классическое колебательное движение, описанное математически синусоидой.

Из графиков (рис. 9-10), рис. 11-12) видно, что колебания, согласно требованиям ТЗ, имеют амплитуду 7,5 градусов, частоту колебаний 12Гц и продолжительность 5 минут.

Сразу после окончания колебательного воздействия произведен замер расхождений между показаниями стола и прибора, которые составили для качаний по крену – 0,439 градуса, по тангажу – 0,943 градуса, что удовлетворяет требованиям ТЗ.

На основании вышеописанных выводов следует, что Бесплатформенная курсовертикаль удовлетворяет пунктам ТЗ, которые основаны на требованиях единых норм летной годности гражданских транспортных самолетов (ЕНЛГ-С) и Technical Standart Order (TSO C-4c).

Для проверки точностных характеристик блока были предложены 2 решения:

1. Для проверки перегрузки от 0g до 3g поворотный стол устанавливается горизонтально и на него подается постоянное ускорение, благодаря чему достигается небольшая погрешность, но нет возможности задать отрицательную перегрузку.

2. Для проверки от -1g до 3g поворотный стол устанавливается вертикально. Проверка от -1g до 1g происходит путем установки стола в определенное статическое положение, а для проверки от 1.1g до 3g используется сложное вращение с ускорением в верхней точке вращения и замедлением в нижней - чувствует сила поля тяжести земли. Данный подход позволяет использовать сразу весь спектра ускорений от -1g до 3g и дает высокую точность при установке перегрузки от -1g до 1g. Отрицательным фактором является более высокая погрешность при измерении от 1.1g до 3g.

Разработанный алгоритм работы ПМО для блока акселерометров представляет собой следующее:

- проверка соединения с поворотным столом;
- проверка соединения с тестируемым прибором.
- отправка полного набора управляющих



**Рисунок 13.**

*Рабочее окно программы проверки блока акселерометров на перегрузку при горизонтальной установке стола*

команд, состоящего из нескольких пакетов, в модуль управления поворотным столом;

- запуск пакета команд с возможностью управления: пользователю представляется возможность выбрать требуемой перегрузки в режиме реального времени;

- циклическое считывание данных о перегрузке с блока акселерометров в течение заданного времени.

Внешний вид интерфейса программ приведен на рис. 13 и рис. 14.

Первоначально пользователю доступна кнопка «Установить связь со стендовым оборудованием». В случае невозможности установки связи с оборудованием кнопки формы не активируются. На кнопке вместо надписи «Установить связь со стендовым оборудованием» появится сообщение об ошибке.

В случае успешного подключения стенда активируются кнопки «Начать тест» и «Отключить стол», становится доступной задача параметров теста. При этом на кнопке «Установить связь со стендовым оборудованием» появится надпись «Оборудование успешно активировано» и кнопка становится неактивной.

При нажатии кнопки «Начать тест» она становится неактивной, происходит загрузка управляющих команд непосредственно в модуль управления. После чего становится активным ползунок «задать перегрузку», где в режиме реального времени можно выставить



**Рисунок 14.**

*Рабочее окно программы проверки блока акселерометров на перегрузку при вертикальной установке стола*

перегрузку, и команда автоматически отправится на модуль управления.

Для завершения теста нужно нажать кнопку «Завершить тест». Тест можно продолжить, нажав кнопку «Начать тест», или выключить оборудование кнопкой «Отключить стол».

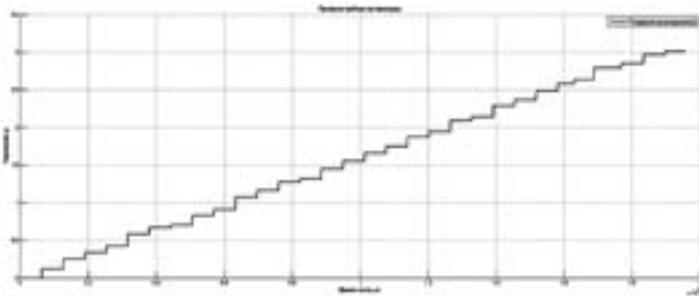
На рис. 15-16 и рис. 17-18 представлены результаты тестирования блока акселерометров при установке поворотного стола в горизонтальное и вертикальное положения.

Из графиков на рис. 15-16 следует, что погрешность блока акселерометров при горизонтальной установке поворотного стола постоянна и не меняется со временем. Эта погрешность обусловлена неточной установкой блока акселерометров на плоскости поворотного стола и неточной выставкой самого стола на поверхности. Погрешность находится в допустимом пределе: не превышает уровня  $\pm 0.1g$ .

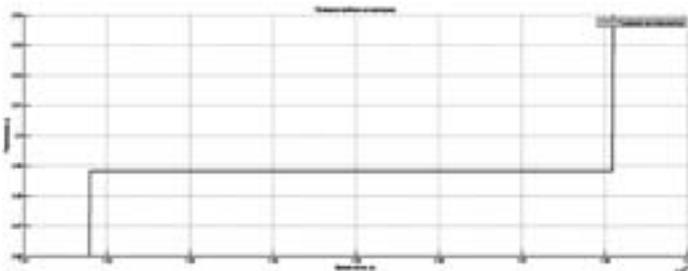
Из графиков рис. 17-18 следует, что погрешность, в сравнении со случаем установки стола в горизонтальное положение, гораздо больше и распределяется в виде колебаний относительно среднего значения заданной перегрузки. Но при этом погрешность не превышает  $\pm 0.1g$ , что удовлетворяет ТЗ.

Итоговыми результатами работы являются:

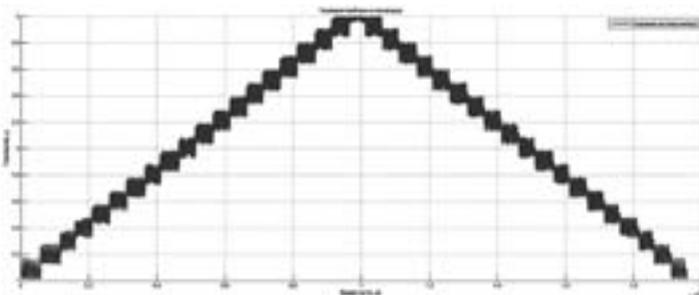
1. Оптимальные алгоритмы управления поворотным столом для создания вращений и колебаний;



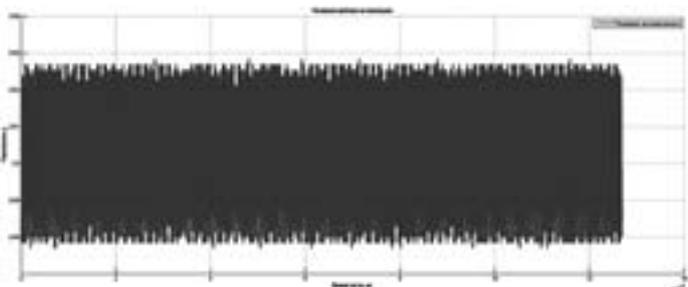
**Рисунок 15.**  
*Результаты проверки блока акселерометров на перегрузку при установке поворотного стола в горизонтальное положение*



**Рисунок 16.**  
*Результаты проверки блока акселерометров на перегрузку 2.5g при установке поворотного стола в горизонтальное положение*



**Рисунок 17.**  
*Результаты проверки блока акселерометров на перегрузку при установке поворотного стола в вертикальное положение*



**Рисунок 18.**  
*Результаты проверки блока акселерометров на перегрузку 2.5g при установке поворотного стола в вертикальное положение*

2. Разработанное ПО, обладающее следующими особенностями:

- работа в операционных системах Windows от 98 и выше;
- простой пользовательский интерфейс (рис. 5, рис. 6, рис. 13 и рис. 14);
- интуитивно понятная последовательность действий;
- возможность оперативно менять угол отклонения, частоту колебаний, время воздействия, перегрузку и сохранять данные в файл.

3. Проведение оценки точностных характеристик Бесплатформенной курсоверткали (рис. 7, рис. 8, рис. 9-10, рис. 11-12) и блока акселерометров (рис. 15-16 и рис. 17-18).

*Список литературы:*

1. Информационно-телекоммуникационные технологии авиационной, ракетной и космической систем. – НИУ МАИ, 2014. URL: [http://www.mai.ru/science/equipment/index.php?SECTION\\_ID=1292](http://www.mai.ru/science/equipment/index.php?SECTION_ID=1292)
2. 1-Осевой стенд серии AC1120S. – АКУТРОНИК Швейцария Лтд., 2014. URL: <http://www.acutronic.com/ru/produkcija/detail/view/1-axis-motion-simulator-series-ac1120s.html>
3. Технические требования к оборудованию самолета. Приложение к главе 8 ЕНЛГ-С «Оборудование самолета», типография ЦАГИ, 1987. – 360 с.
4. Калихман Д.М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов - СПб.: Изд - во ЦНИИ «Электроприбор», 2008. - 237с.
5. Козлов Д.П. Использование поворотных столов и вибростендов для калибровки микромеханических акселерометров СПб.: Изд – во ЦНИИ «Электроприбор» 2014. -16с.
6. Квалификационные требования КТ-160D «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования», АРМАК 2004. – 327с.
7. Метешкин К.А. Бобыр Е.И. Предложения по усовершенствованию технологии полунатурных испытаний АСУ – 2000. – 5с.
8. Technical Standart Order (TSO C-4c). Bank and pitch instruments. – Federal Aviation Administration, 2014. URL: [http://www.faa.gov/aircraft/air\\_cert/design\\_approvals/tso/](http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/tso/) .
9. Acutronic Technical Manuals for the AC1120S Single Axis Rate Table. Job No.: J.70’053. Acutronic Switzerland Ltd., July 2008.

## ***ВЕХИ ЖИЗНИ*** *Александра Ивановича Гоева*

Александр Иванович Гоев родился в 1947 году в городе Славгороде, Могилевской области. Рано остался без отца и ему пришлось шагать по жизни одному, самостоятельно прокладывая себе дорогу.



*Генеральный директор  
Гоев Александр Иванович*

В 1970 году, после окончания с отличием Могилевского машиностроительного института, начал работу на Загорском оптико-механическом заводе инженером-технологом, мастером, старшим инженером-технологом, начальником техбюро.

Сослуживцы Загорского завода вспоминают Александра Ивановича с искренней теплотой, рассказывали, как он трудился и профессионально рос на этом предприятии.

Александр Иванович Жаров вспоминает, как он трудился, придя в технологическое бюро инструментального цеха. Он всем приглянулся, показался очень симпатичным. Александр Иванович все схватывал на лету, был очень грамотным специалистом, быстро во все вникал, проявлял в работе настоящую хватку.

Волевой, целеустремленный, интересный он в коллектив влился стремительно, будто всю жизнь в нем работал.

В 1976 году решением Министерства оборонной промышленности А.И.Гоев был направлен заместителем главного инженера в город Сморгонь Белорусской ССР на завод оптического машиностроения, где впоследствии стал заместителем директора по производству, затем директором завода.

На Сморгонском заводе, будучи еще совсем молодым директором, Гоев уделял много времени работе с людьми, проводил тщательную кадровую политику, лично знакомился с каждым специалистом и проявлял незаурядную настойчивость в продвижении многих сотрудников по службе с пользой для дела.

Руководство Министерства оборонной промышленности оценило работу молодого руководителя и направило его для повышения квалификации в Академию народного хозяйства при Совете Министров СССР.

Еще во время работы на Сморгонском заводе, в возрасте 39 лет, за год до окончания академии, А.И.Гоев был назначен на должность генерального директора «Красногорский завод им. С.А.Зверева».

Ему всегда были нужны новейшие технологии, современные разработки, новые изделия, убедительные победы и перспективы.

Обладая государственным умом, он всегда умел четко поставить сложнейшую задачу перед каждым представителем своей команды, специалистами и рабочими.

Это позволяло гарантировать ее исполнение на самом высоком качественном уровне.

В этот период были возведены новые цеха, реконструирована часть действующих, организован целый ряд самостоятельных подразделений, требующих новых подходов в деятельности предприятия: «Зенит-спецтехника», «Зенит-стройсервис», «Зенит-техсервис», внешнеторговая фирма «Зенит» и другие подразделения.

При непосредственном участии генерального директора были разработаны и основаны в производстве новые изделия: приборы ночного видения, медицинская техника, лазерные микроанализаторы, биноклярные лупы. Завершились работы по созданию комплекса контроля околоземного космического пространства «Окно».

Активный поиск свободных ниш на международном и внутреннем рынке, разработка новых направлений и видов деятельности, способных дать ощутимую прибыль, характеризует Александра Ивановича Гоева, как руководителя современного склада.



*У памятника погибших в Великую Отечественную войну заводчан. 9 мая 1988 г.*



*Торжественное собрание по случаю 50-летия КМЗ. 1992 г.*

В 2005 году он вошел в список ста наиболее выдающихся представителей российской промышленности.

В период работы на предприятии широко осваивались направления основной деятельности предприятия:

– оптико-электронная бортовая космическая аппаратура дистанционного зондирования Земли;

– аэрофото- и электронно-оптическая аппаратура мониторинга земной поверхности, инженерной и экологической разведки;

– оптико-электронная аппаратура и

средства контроля космического пространства;

– система управления огнем и прицельные комплексы для бронетанковых средств;

– обзорно-прицельные комплексы для авиационных средств;



*Торжественное собрание по случаю 80-летия С.А.Зверева. Слева его родственники.*

- оптические высокоточные системы дальнометрирования и наблюдения;
- оптико-электронные системы наблюдения, фиксации и передачи изображения;
- оптико-электронная промышленная научная и диагностическая медицинская аппаратура;

- оптические дневные и ночные приборы общегражданского назначения.

Управление таким гигантом, как КМЗ в прошлые годы, не всегда проходило гладко.

Бывали сложные ситуации, возникали спорные вопросы.

Александр Иванович принимая решение, внимательно выслушал все мнения. Особой его заслугой является сохранение в период формирования новых рыночных отношений научно-технического производственного и кадрового потенциала одного из ведущих предприятий ОПК страны – «Красногорский завод им. С.А.Зверева».

Во время руководства А.И.Гоева завод стал акционерным обществом.

Доверие заводского коллектива своему директору наглядно было доказано итогами первых в истории КМЗ выборов руководителя предприятия в конце 1994 года.

Отдавая голос за кандидатуру Александра Ивановича Гоева, заводчане оценили его, как технически эрудированного специалиста, талантливого организатора.

А.И.Гоев всегда активно берег кадры, прекрасно понимая, что «разбазарить» имеющийся потенциал можно в одночасье, а вот на восстановление уйдут десятилетия. Предвидя, что рано или поздно нужда в профессионалах проявится, и, как показало время, был абсолютно прав.

Насколько это было возможно, Александр Иванович старался находить средства и для поддержания и развития социальной среды.

И даже в перестроечные времена, когда средств не было в стране вообще, заводские санатории-профилактории принимали работников с семьями, реконструировались общежития,



*60-летие КМЗ. Гоев А.И. вручает диплом им. В.В.Некрасова лучшим работникам НТЦ*

оснащались современным оборудованием медико-санитарные учреждения, был сдан новый физкультурно-оздоровительный комплекс и началось снова жилищное строительство.

Александр Иванович постоянно занимался повышением своей квалификации.

В 1994 году, защитив диссертацию, стал кандидатом технических наук, а в 2003 году стал доктором технических наук.

Он автор нескольких десятков научных работ, восьми изобретений, разработчик книг и учебных пособий. Научные знания и большой производственный опыт Александра Ивановича были направлены на безусловное и качественное выполнение государственного оборонного заказа, сохранение и развитие материальной и производственной базы, создание устойчивого финансового положения предприятия.

В 1995 году он получил почетный Международный приз за коммерческий престиж Золотой «Факел Бермингема», а с ним получил его и ОАК КМЗ. Что означает эта награда для завода?

В первую очередь, международное признание, потому что «Факел Бермингема», учрежденный Институтом международных финансов и экономического партнерства, международной академией лидеров бизнеса, является весьма престижной наградой в деловых кругах бизнеса и предпринимательства.

А.И.Гоев был доцентом кафедры «Лазерные оптико-электронные приборы и системы» МГТУ им. Н.Э.Баумана, председателем государственной экзаменационной комиссии МИРЭА, вице-президентом Международной общественной научно-технической академии «Контенант» в области оптических наук, единственным почетным членом которой он является и сейчас,



*Выступление на митинге, посвященном 60-летию Победы. 9 мая 2005 г.*

членом Академии инженерных наук РФ, членом-корреспондентом Российской академии ракетных и артиллерийских наук, академиком Международной

Платоновской академии наук, Почетным членом академии космонавтики им. К.Э.Циолковского, Заслуженным создателем космической техники Федерации космонавтики России.

Александр Иванович Гоев – лауреат государственных премий Белорусской ССР (1986) и Российской Федерации (1993), премии Правительства РФ в области науки и техники (2004), национальной премии им. Петра Великого (2003). Он награжден орденами «Знак Почета» (1987), «За заслуги перед Отечеством» IV степени (1999), «За заслуги перед Отечеством» III степени (2006), орденом Преподобного Сергия Радонежского III степени (2000).

Александр Ивановичу присвоены звания «Заслуженный машиностроитель Российской Федерации (1996), Почетный гражданин Красногорского района. В юбилейный для завода 2007 год Гоев удостоен высшей награды Федерации космонавтики России – медали «За заслуги».

Вся жизнь Александра Ивановича была посвящена развитию предприятий оптико-электронного приборостроения.

С мая 2006 года Александр Иванович Гоев был назначен постоянным членом Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации.

«Мы все – одна команда», - не раз говорил Александр Иванович. И то, что корабль под названием «Красногорский завод» выдержал все штормы последних лет и по-прежнему на плаву, – его главная заслуга.



*Реконструкция здания завода, выполненная при А.И.Гоеве*

ПРЕЗИДИУМ  
ОБЩЕСТВЕННОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ АКАДЕМИИ «КОНТЕНАНТ»

ISSN: 2307-5767



# КОНТЕНАНТ

НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*ЮБИЛЕЙНЫЙ ВЫПУСК*



ТОМ 16  
НОМЕР 2  
ИЮНЬ 2017

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ

точность



надежность



высокие технологии



1957-2017



Joint-Stock Company Scientific and Production Association  
State Institute of Applied Optics



*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

### **Иванов В.П.**

К юбилею Государственного института прикладной оптики  
**Балоев В.А., Рагинов С.В., Скочилев А.Ф.** 125

Влияние качества изготовления поверхностей зеркал астро-  
визирного устройства на отношение сигнал/шум ..... 129  
**Азаматов М.Х., Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г.**

### **Насыров А.Р., Нигматуллина Н.Г., Нуруллин И.З.**

Двухспектральный инфракрасный объектив с дискретно из-  
меняемым фокусным расстоянием ..... 134

### **Михалицын А.В.**

Методика оценки эффективности бленд ..... 138

### **Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилев А.Ф.**

Некоторые вопросы исследования термодформаций зерка-  
ла контррефлектора телескопа «Миллиметр» на основе  
использования асферо-голограммного пробного стекла ..... 142

### **Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л.**

Оценка точностных характеристик измерительных  
тепловизионных приборов ..... 146

### **Овсянников В.А., Филиппов В.Л.**

Повышение достоверности экспертного контроля разреше-  
ния на местности воздушной тепловизионной аппаратуры ... 156

**Лукин А.В., Мельников А.Н., Ахметов М.М., Берденни-  
ков А.В., Гайнутдинов И.С., Жданова А.В., Иванов В.П.,  
Лисова Е.Г., Могилюк И.А.**

Реплицированная асферическая оптика. Основные аспекты  
организации серийного и массового производства ..... 167

### **Гусев А.Г., Кольцов А.Ю., Хасанов А.М.**

Термостабильные интерференционные фильтры ИК области  
спектра ..... 173

# К ЮБИЛЕЮ ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ

В 2017 году исполняется 60 лет со дня образования Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО ГИПО»), который на протяжении десятилетий выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области разработки опико-электронных систем различного назначения, обладая соответствующим научным, производственным и кадровым потенциалом.

История АО «НПО ГИПО» берёт свое начало 12 апреля 1957 года - с даты создания в г. Казани Филиала Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (г. Ленинград) – ФГОИ.

В 1966 году филиал становится самостоятельным научным центром – Государственным институтом прикладной оптики (ГИПО). Развив свою экспериментально-производственную базу, ГИПО в 1991 году преобразуется в научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики».

В 2008 году НПО ГИПО вошло в состав Государственной корпорации «Ростехнологии», в 2009 – в состав Холдинга «ОАО «Научно-производственный концерн «Оптические системы и технологии» (ныне – АО «Швабе»).

1 декабря 2010 года осуществлена государственная регистрация открытого акционерного общества «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», созданного путём реорганизации в форме преобразования ФГУП «НПО «ГИПО».

С 1998 года генеральным директором АО «НПО ГИПО» является Владимир Петрович Иванов, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, академик Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, советник Российской артиллерийско-ракетной Академии наук, член Научно-технического Совета Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, заслуженный деятель науки Российской Федерации и Республики Татарстан, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники.



Генеральный директор  
**ИВАНОВ**  
Владимир Петрович





Значительная часть выпускаемой и разрабатываемой продукции предприятия предназначена для комплектования сложных оптико-электронных систем, разрабатываемых предприятиями Госкорпорации «Ростех».

#### Направления деятельности:

- тепловизионные приборы,
- оптико-электронные каналы различного назначения,
- исследования оптических характеристик объектов и фонов,
- метрологическое обеспечение инфракрасной техники,
- оптические покрытия,
- дифракционная оптика,
- асферическая оптика,
- инфракрасные объективы.



Объединение располагает современным исследовательским, производственно-технологическим и испытательным оборудованием, необходимой метрологической базой и квалифицированным персоналом. Технологические возможности и производственные мощности позволяют осуществить полный цикл исследований, разработки, изготовления опытных образцов и малосерийного выпуска новейших видов оптико-электронных приборов различного назначения для областей спектра от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной.

АО «НПО ГИПО» является головной организацией АО «Швабе» по разработке, проектированию и выпуску тепловизионных каналов.



Объединение проводит комплексные исследования излучения различных объектов, заметности военной техники и промышленных объектов, исследования, разработку и производство тепловизионной техники, теплопеленгационных систем, специальной контрольно-измерительной и метрологической аппаратуры, разработку оптической компонентной базы и оптических технологий в интересах обороны, экологического мониторинга окружающей среды, здравоохранения, оптико-электронных приборов, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

На опытно-экспериментальном производстве (опытный завод) изготавливаются экспериментальные и опытные образцы сложных оптико-электронных приборов, технологических установок и стендов для выполнения фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований, а также промышленные партии разрабатываемых предприятием изделий.



**Тепловизионные прицелы для противотанковых ракетных комплексов**

С семидесятых годов прошлого столетия на предприятии проводятся работы по созданию тепловизионной техники. В 1985-1986 годах впервые в Советском Союзе принят на вооружение и внедрён в серийное производство разработанный в НПО ГИПО тепловизионный прицел 1ПН65 для противотанкового ракетного комплекса (ПТРК) «Фагот». Дальнейшее развертывание работ в данном направлении позволило создать целый ряд тепловизионных прицелов для переносных ПТРК и освоить их серийный выпуск на опытном заводе объединения. В настоящее время осуществляется серийное производство ряда тепловизионных каналов 2-го и 3-го поколений собственной разработки для оснащения комплексов В и ВТ различных видов и родов войск.

За последнее десятилетие значительно расширилась тематика выполняемых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также номенклатура выпускаемой серийной продукции. Предприятие стало лидером в стране в области разработки систем обнаружения и наведения для лазерных станций обороны авиационных комплексов (вертолетов и самолетов военного назначения, пассажирских, военно-транспортных и литерных самолетов) от атакующих ракет переносных зенитно-ракетных комплексов (ПЗРК).

Сегодня более 20 современных и модернизированных комплексов высокоточного оружия оснащаются разработанными и серийно освоенными на предприятии оптико-электронными приборами и системами.

АО «НПО ГИПО» обладает уникальной эталонной и образцовой измерительной базой, позволяющей хранить и передавать единицы энергетической фотометрии в видимой и ИК областях спектра на уровне мировых стандартов.

В объединении созданы база данных по характеристикам излучения целей, объектов, искусственных и естественных фонов, природных образований и ландшафтов, являющаяся тем фундаментом, который необходим при определении требований к разработке и испытаниям оптико-электронной аппаратуры; метрологическая база, послужившая основой Государственной метрологической службы средств имитации астрономических источников излучения для контроля параметров систем астроориентации, астронавигации и астрокоррекции.



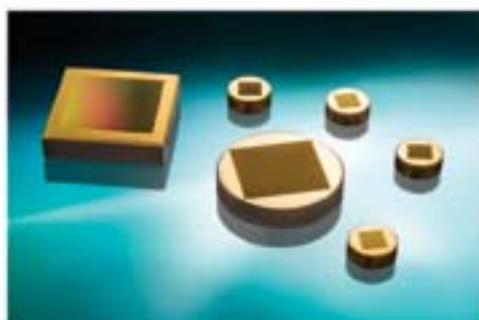
Тепловизионные приборы и каналы для комплексов ВиВТ



В АО «НПО ГИПО» имеется научно-производственный комплекс по разработке и серийному изготовлению всех видов нарезных и голограммных дифракционных решеток (спектроскопических, эшелле, эшелеттов, решеток для лазеров, решеток-поляризаторов ИК излучения и др.), в подземной лаборатории которого сосредоточена одна четвертая часть мирового парка делительных машин для нарезания решеток.



В объединении разработано и освоено более 200 базовых оптических технологий, которые были использованы при создании высокоразрешающих ИК объективов, оптических элементов с высокими коэффициентами отражения и пропускания, в том числе, стойких к мощному лазерному излучению. Разработанные в НПО ГИПО технологии изготовления интерференционных фильтров, просветляющих покрытий для ИК области спектра внедрены и используются многими оптическими предприятиями России и стран СНГ при создании как спецтехники, так и приборов гражданского назначения.



За последние годы в АО «НПО ГИПО» реализован ряд целевых программ технического перевооружения производства на основе последних достижений мирового машиностроения и приборостроения.

Выполняемые в настоящее время проекты технического перевооружения научно-экспериментальной базы предприятия направлены на обеспечение научных, конструкторских и технологических подразделений новейшим высокопроизводительным оборудованием (измерительным, исследовательским, аналитическим, метрологическим и т.п.) и охватывают все профильные для предприятия научно-технические направления оптико-электронного приборостроения.



За шестидесятилетнюю историю существования объединением накоплен уникальный опыт, создана база знаний, разработаны оптические технологии, созданы производства для решения, практически, любых задач оптического и оптико-электронного приборостроения и технологий.

НПО ГИПО имеет тесные научно-технические связи более чем с 200 предприятиями, НИИ, ВУЗами, является членом Международной лазерной ассоциации (LAS), Международного общества по оптической инженерии (SPIE), Оптического общества им. Д.С. Рождественского, Русского оптического общества.



# ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗЕРКАЛ АСТРОВИЗИРНОГО УСТРОЙСТВА НА ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ

БАЛОЕВ В.А., РАГИНОВ С.В., СКОЧИЛОВ А.Ф.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*Представлены результаты исследования влияния качества поверхностей изготовленных сферических и асферических зеркал на отношение сигнал/шум астровизирного устройства. Рассмотрен способ получения допусков на среднеквадратическое отклонение профилей оптических элементов от расчетной формы, которые обеспечат достижение заданных предельно различимых звездных величин астроориентиров.*

**Ключевые слова:** астровизирное устройство, отношение сигнал/шум, отклонение профиля асферической поверхности от расчетной формы.

Основными элементами астровизирного устройства (АВУ) являются оптическая система (ОС), которая строит изображение участка звездного неба в своей фокальной плоскости, и матричное фотоприемное устройство (МФПУ), располагающееся в фокальной плоскости ОС. Для получения высокого качества оптического изображения, создаваемого ОС в фокальной плоскости, необходимо добиваться, чтобы поверхности оптических элементов АВУ имели форму, наиболее приближенную к расчетной. Однако в процессе изготовления оптических элементов неизбежно появляются дефекты поверхностей, одной из важнейших характеристик которых является волнистость поверхности, т.е. периодически проявляющиеся неровности, имеющие размеры гораздо большие по сравнению с шероховатостью.

Современные программы для расчета оптических систем позволяют исследовать влияние волнистости поверхности оптических элементов на любые характеристики ОС (волновые и геометрические aberrации, функцию рассеяния точки, оптическую пере-

даточную функцию, концентрацию энергии и т.д.). Поверхности могут быть плоскими, сферическими или асферическими. В данной работе исследуется влияние качества изготовления зеркальных поверхностей ОС на отношение сигнал/шум АВУ и рассмотрен способ получения допусков на среднеквадратическое отклонение (СКО) профилей оптических элементов ОС от расчетной формы, которые обеспечивают достижение заданных предельно различимых звездных величин астроориентиров.

Специфика АВУ заключается в том, что для определения максимально точных координат звезды её дифракционное изображение должно укладываться в размер одного пиксела МФПУ, поэтому отношение сигнал/шум  $\mu$  определяется количеством фотоэлектронов, сгенерированных в пикселе от звезды и шумового фона. Если изображение звезды занимает несколько пикселов, то эти пикселы объединяются в один так называемый «эквивалентный пиксел».

Параметрами ОС, необходимыми для расчета  $\mu$ , являются фокусное расстояние  $F$  (см),

диаметр входного зрачка  $D$  (см), а также безразмерные величины  $\varepsilon$  и  $\alpha(\lambda)$ , характеризующие, соответственно, центральное экранирование и спектральное пропускание ОС для заданного диапазона длин волн  $\lambda$  (мкм). Абберрационные характеристики ОС учитываются в функции концентрации энергии  $KЭ$  ( $\lambda, \varepsilon, \rho$ ), которая показывает, какая часть световой энергии от звезды, прошедшей через входной зрачок ОС, сосредоточена в кружке радиусом  $\rho$  (мкм) в фокальной плоскости. Для идеальной безабберационной ОС концентрация энергии рассчитывается по формуле

$$KЭ(\lambda, \varepsilon, \rho) = \frac{1}{1 - \varepsilon^2} \left\{ 1 - J_0^2(2\pi\rho_0) - J_1^2(2\pi\rho_0) + \varepsilon^2 \left[ 1 - J_0^2(2\pi\rho_0\varepsilon) - J_1^2(2\pi\rho_0\varepsilon) \right] - 4\varepsilon \int_0^{\rho_0} J_1(2\pi r\varepsilon) \frac{J_1(2\pi r)}{r} dr \right\}, \quad (1)$$

где безразмерный параметр  $\rho_0 = \frac{\rho D}{2\lambda F}$ ,  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, соответственно, а интегрирование ведется по радиусу входного зрачка  $r$ .

Если в АВУ используется светофильтр, отсекающий какую-либо часть спектрального диапазона, то необходимо знать его спектральное пропускание  $\alpha_\phi(\lambda)$ .

Для МФПУ нужно знать размер пиксела  $d$  (мкм), темновой ток  $N_{Dark}$  (e/c), шум считывания  $N_{Read}$  (e), количество пикселов  $n_{pic}$ , входящих в «эквивалентный пиксел», квантовую эффективность  $\eta(\lambda)$ , которая определяет спектральный диапазон чувствительности МФПУ (от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ ), а также величину потенциальной ямы  $U$  (e), которая ограничивает время экспозиции  $t$  (с).

Шум фона в пикселе складывается из электронного шума МФПУ, фотонного шума от боковой засветки Солнца после подавления её блендой и фотонного шума, вызванного рассеянным светом в столбе атмосферы, находящемся в поле зрения данного пиксела. Поскольку боковая засветка может быть эффективно устранена блендой (коэффициент

подавления бленды определяется её габаритами и конструкцией), то при оценке  $\mu$  она обычно не учитывается [1-5].

Формула для расчета накопленного за время экспозиции  $t$  отношения сигнал/шум  $\mu$  имеет вид [1]

$$\mu = \frac{N_A t}{\sqrt{N_A t + n_{pic} (N_B t + N_{Dark} t + N_{Read}^2)}}, \quad (2)$$

где количество фотоэлектронов от астроориентира  $N_A$  (e/c) и от фоновой засветки  $N_B$  (e/c), образующихся за единицу времени в пикселе МФПУ, определяются следующим образом [2,3]:

$$N_A = S_{ex} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_m(\lambda) \eta(\lambda) \alpha_\phi(\lambda) KЭ(\lambda, \frac{d_{эКВ}}{\sqrt{\pi}}) \alpha(\lambda) \tau_{амм}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$N_B = S_{ex} \Omega_{pic} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda) \eta(\lambda) \alpha_\phi(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$S_{ex} = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \varepsilon^2)$  – площадь входного зрачка ОС, см<sup>2</sup>;

$d_{эКВ} = d \sqrt{n_{pic}}$  – размер «эквивалентного пиксела», мкм;

$\Omega_{pic} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d}{F} \right)^2$  – телесный угол области неба, проецирующийся на пиксел МФПУ, ср;

$\tau_{амм}(\lambda)$  – спектральное пропускание атмосферы при наблюдении в зенит;

$A_m(\lambda)$  – спектральная светимость астроориентира, фотон/(см<sup>2</sup> · с · мкм);

$B(\lambda)$  – спектральная яркость фоновой засветки, фотон/(см<sup>2</sup> · ср · с · мкм).

Для расчета количества фотонов, попадающих на пиксел МФПУ от звезд и рассеянного света в столбе атмосферы, находящемся в поле зрения данного пиксела, необходимо знать спектральные светимости звезд  $A_m(\lambda)$  и спектральную яркость атмосферы  $B(\lambda)$  на заданной высоте, на которой будет использоваться АВУ. Для звезд, характеризующихся звездной величиной  $m$ , спектральные светимости  $A_m(\lambda)$  определяются через спектральную светимость  $A_0(\lambda)$  звезд нулевой звездной величины:  $A_m(\lambda) = 10^{-0.4m} A_0(\lambda)$ . Необходимые для расчета  $\mu$  значения функций  $A_0(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  и  $\tau_{амм}(\lambda)$  можно взять, например, из работы [6].

В качестве примера рассмотрим МФПУ, параметры которого, необходимые для

**Таблица 1.**  
**Параметры МФПУ**

Размер пиксела $d$ , мкм	5.5
Темновой ток $N_{Dark}$ , e/c	125
Шум считывания $N_{Read}$ , e	13
Потенциальная яма $U$ , e	13500

вычисления отношения сигнал/шум, приведены в таблице 1.

На рис.1 приведена спектральная характеристика квантовой эффективности  $h(\lambda)$  матрицы МФПУ.

В соответствии с рис. 1 спектральный диапазон чувствительности матрицы МФПУ определяет пределы интегрирования в формулах (3)-(4) от  $\lambda_1=0.3$  мкм до  $\lambda_2=1.1$  мкм.

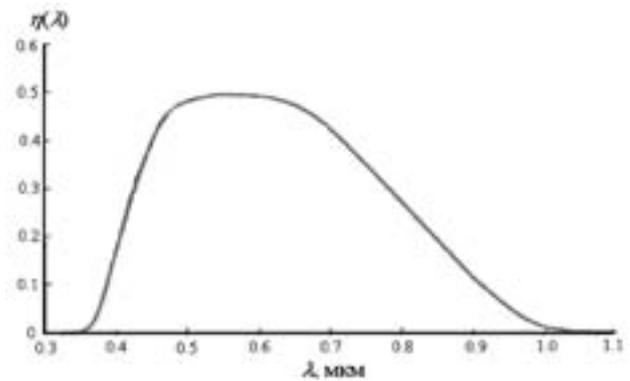
Рассмотрим четырехзеркальное АВУ с двумя сферическими и двумя асферическими поверхностями, которое имеет следующие параметры ОС:  $D=7$  см,  $F=47$  см,  $\varepsilon=0.514$ , пропускание  $\alpha(\lambda)\cong 0.9$ . Расчетные значения концентрации энергии близки к дифракционному пределу, поэтому  $KЭ(\lambda, \varepsilon, \rho)$  для поверхностей с СКО = 0 можно вычислять по формуле (1).

Для реально изготовленных зеркальных поверхностей с отличным от нуля СКО концентрация энергии  $KЭ(\lambda, \varepsilon, \rho)$  должна вычисляться с учетом реальных aberrаций, вносимых отклонениями профилей поверхностей оптических элементов ОС от расчетной формы.

В качестве светофильтра рассмотрим нанесенный на одну из зеркальных поверхностей интерференционный фильтр, спектральное пропускание  $\alpha_\phi(\lambda)$  которого представлено на рис. 2.

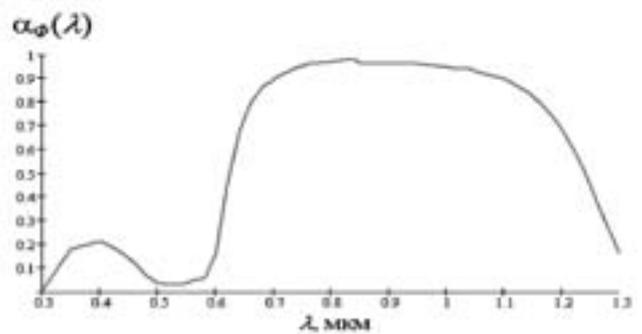
Существует бесконечное число вариантов формы отклонений профиля, которые характеризуются одинаковыми значениями СКО, но приводят к совершенно различным aberrациям ОС и, соответственно, разным для данного АВУ предельно различимым звездным величинам  $m$ .

В качестве примера рассмотрим два реально измеренных профиля асферических поверхностей с СКО  $\approx 0.1$  мкм, конкретные отклонения  $\Delta z(\rho)$  которых от расчетной формы представлены на рис. 3 вместе с двумя базисными



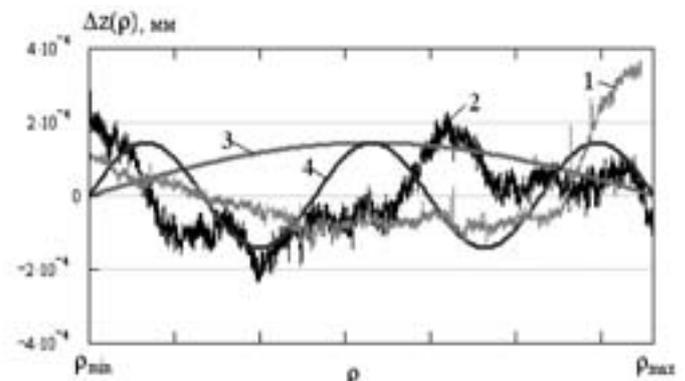
**Рисунок 1.**

**Квантовая эффективность матрицы МФПУ**



**Рисунок 2.**

**Спектральное пропускание  
интерференционного фильтра**

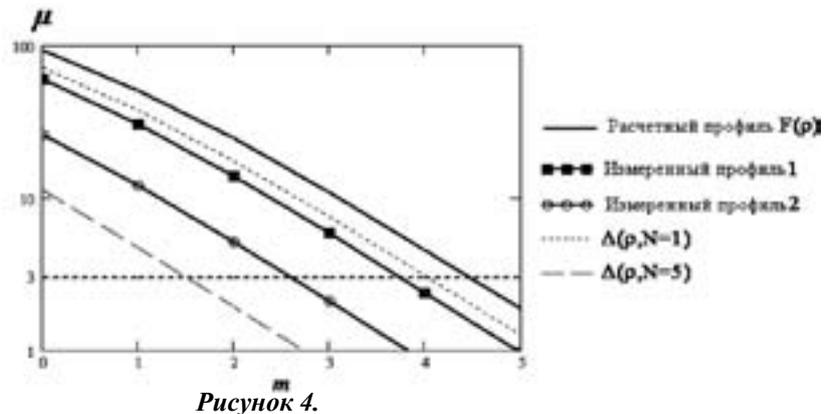


**Рисунок 3.**

**1, 2 – отклонения профилей асферических поверхностей;  
3 – базисная функция  $\Delta(\rho, N=1)$ ,  
4 – базисная функция  $\Delta(\rho, N=5)$**

функциями  $\Delta(\rho, N=1)$  и  $\Delta(\rho, N=5)$  [7], имеющими одинаковую амплитуду  $\delta = 0.142$  мкм.

Как следует из результатов работы [7], значения  $\mu$  для реального профиля изготовленного оптического элемента ОС, имеющего такое же СКО, как и у базисной функции  $\Delta(\rho, N=5)$ , будут не меньше, чем рассчитанные для  $\Delta(\rho, N=5)$ , но и не больше, чем для базисной функции  $\Delta(\rho, N=1)$ .



**Рисунок 4.**  
*Зависимость  $\mu$  от звездной величины  $m$  при отклонениях профилей, представленных на рис. 3, от расчетной формы*

Вычисленные значения отношения сигнал/шум  $\mu$  для профилей, рассмотренных на рис. 3, в зависимости от звездной величины  $m$  представлены на рис. 4. Расчеты  $m$  по формулам (2)-(4) проведены для «красных» звезд класса К [6], времени экспозиции  $t=0.5$  мс и «эквивалентного пиксела», объединяющего четыре пиксела матрицы МФПУ ( $n_{pic}=16$ ).

Для регистрации астроориентира на изображении, создаваемом МФПУ, необходимо, чтобы отношение сигнал/шум удовлетворяло условию  $\mu \geq 3$  [4,5].

Как видно из рис. 4, предельно различимая звездная величина для расчетного профиля асферики имеет значение  $m_0=4.5$ , в то время как для измеренного профиля 1 она равна  $m_1=3.75$ , а для профиля 2  $m_2=2.5$ , то есть уменьшение предельно различимой звездной величины от расчетного значения  $\Delta m_{i,2}=(m_{i,2}-m_0)$  составляет  $\Delta m_{i,1}=-0.75$  и  $\Delta m_{i,2}=-2$ . При других возможных формах отклонений  $\Delta z(\rho)$  измеренных профилей, имеющих СКО=0.1 мкм, могли бы получиться значения  $\Delta m$  в диапазоне от  $\Delta m=-0.5$  до  $\Delta m=-3$  в зависимости от близости отклонений  $\Delta z(\rho)$  к базисным функциям  $\Delta(\rho, N=1)$  или  $\Delta(\rho, N=5)$ , соответственно.

Таким образом, если бы допустимое СКО профиля поверхности оптического элемента ОС от расчетной формы было установлено на уровне СКО=0.1 мкм, то это означало бы, что в пределах этого допуска предельно различимые звездные величины для данного АБУ могут принимать значения от  $m_{min}=1.5$  до  $m_{max}=4$  в зависимости от конкретного вида отклонения  $\Delta z(\rho)$  измеренного профиля оптического элемента.

Диапазоны предельно различимых звездных величин при других значениях СКО можно получить, используя при вычислении  $m$  ба-

зисные функции  $\Delta(\rho, N=1)$  и  $\Delta(\rho, N=5)$  с соответствующими амплитудами  $\delta=1.42 \cdot \text{СКО}$ . Результаты расчета представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, диапазон возможных значений  $\Delta m$  растет с увеличением СКО, но при СКО=0.02 мкм он практически «схлопывается» до нуля, приближая значение предельно различимой звездной величины к расчетному (безабберрационному) значению  $m_0=4.5$  для любых возможных форм отклонений  $\Delta z(\rho)$  с данным СКО.

Таким образом, если, например, АБУ предназначено для обнаружения астроориентиров со значением звездной величины не менее 4.5, то допуск на СКО оптических элементов ОС от расчетной формы должен быть не более 0.02 мкм. Для сферических поверхностей такие значения СКО достигаются легко, но для асферических поверхностей этот допуск может представлять определенную трудность. Для снижения требования по допуску на СКО необходимо увеличить время экспозиции  $t$ . На рис.6 приведены результаты расчета отношения сигнал/шум для СКО=0.06 мкм при времени экспозиции  $t=2$  мс.

Как видно из рис. 6 для экспозиции 2 мс требования по достижению АБУ предельно различимой звездной величины  $m_0=4.5$  могут быть выполнены для любых профилей оптических элементов с СКО не более 0.06 мкм. Такие значения СКО вполне достижимы при изготовлении асферических поверхностей.

В заключение можно отметить, что современные методы контроля качества поверхностей и программы для расчета оптических систем позволяют оценить влияние отклонений профилей поверхностей от расчетной формы на отношение сигнал/шум АБУ и получить до-

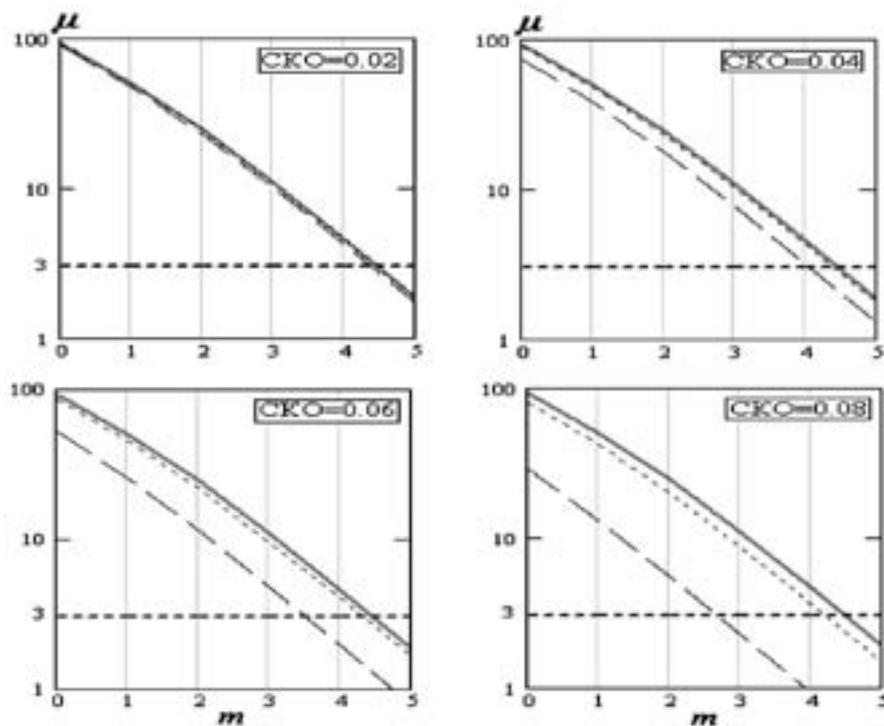


Рисунок 5.

Зависимость  $\mu$  от звездной величины  $m$  для разных значений СКО (в мкм) при  $t=0.5$  мс. Обозначения те же, что на рис. 3

пуски на СКО изготавливаемых оптических элементов, которые обеспечат достижение заданных предельно различимых звездных величин.

Список литературы:

1. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. Second edition / Cambridge University Press, USA, New York, 2006.-208 p.

2. Schroeder D.J. Astronomical optics. Second edition / Academic Press, UK, London, 2000.-478 p.

3. Hobbs P.C.D. Building electro-optical systems: making it all work. Second edition / Wiley series, USA, New Jersey, 2009.-800 p.

4. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Снеткова Н.И., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е. Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.- 2013.- Т. 10.- № 2.- С.9-29.

5. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С. Расчёт оптимальных характеристик оптической системы и матричного приёмника излучения звездного датчика ориентации по его тактико-техническим характеристикам // Сб. тр. 3-й Всеросс. конф. «Совр. проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». 10-13 сентября 2012, Россия, Таруса / Под ред. Г.А. Аванесова. М: ИКИ РАН, 2013.- С.80-90.

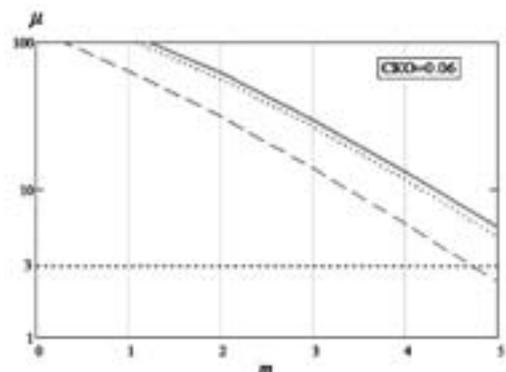


Рисунок 6.

Зависимость  $\mu$  от звездной величины  $m$  для СКО=0.06 мкм при  $t=2$  мс. Обозначения те же, что на рис. 3

6. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Ваваев В.А., Мыслик Е.А., Куркина А.Н., Снеткова Н.И., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е. Бесплатформенная астроинерциальная навигационная система авиационного применения // Сб. тр. 2-й Всеросс. конф. «Совр. проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». 13-16 сентября 2010, Россия, Таруса / Под ред. Г.А. Аванесова. М: ИКИ РАН, 2011.-С.13-35.

7. Балоев В.А., Рагинов С.В., Скочилов А.Ф. Исследование влияния нерегулярностей (волнистости) поверхности оптических элементов на характеристики инфракрасных объективов // Оборонная техника.- 2014. -№1-2.- С.3-8.

# ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ОБЪЕКТИВ С ДИСКРЕТНО ИЗМЕНЯЕМЫМ ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ

АЗАМАТОВ М.Х., ГАЙНУТДИНОВ И.С., ГУСЕВ А.Г. НАСЫРОВ А.Р., НИГМАТУЛЛИНА Н.Г.,  
НУРУЛЛИН И.З.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*Представлен объектив с дискретно изменяемым фокусным расстоянием для работы в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм. Рассмотрены двухдиапазонные просветляющие покрытия с областями пропускания 3,5... 4,5 мкм и 8...10,3 мкм для линз из германия и селенида цинка. Приведены конструкции и спектральные характеристики таких покрытий.*

**Ключевые слова:** инфракрасный объектив, двухдиапазонные оптические покрытия.

В настоящее время активно прорабатывается возможность создания тепловизионных систем, одновременно работающих в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм [1-3]. Очевидным преимуществом таких систем является возможность выбора спектрального диапазона, обеспечивающего наибольшее разрешение. Кроме того, при совместной обработке тепловизионных кадров, одновременно полученных в обоих спектральных диапазонах, есть возможность выявления новых информационных признаков [4], позволяющих увеличить дальность обнаружения и идентификации объектов.

Наиболее предпочтительным вариантом построения такой тепловизионной системы является сочетание общих для обоих спектральных диапазонов приемной оптической системы и матричного фотоприемного (МФПУ) устройства.

На основе анализа известных [5-8] оптических систем тепловизионных приборов нами построена схема двухспектрального объектива с дискретно изменяемым фокусным расстоянием, формирующего изображение высокого качества в плоскости

охлаждаемого МФПУ и обеспечивающего хорошее пропускание в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм за счет просветляющих покрытий оптических поверхностей. Оптическая схема и расчетные характеристики качества этого объектива нами представлены в описании патента [9]. В таблице 1 приведены конструктивные параметры объектива, а на рисунке 1 представлена его оптическая схема.

Серьезной проблемой в реализации такого объектива является сложность достижения приемлемого коэффициента пропускания для обоих значений фокусного расстояния и в обоих спектральных диапазонах с обеспечением коррекции хроматических aberrаций. Обычно это достигается выполнением линз, входящих в компоненты объектива, из материалов, составляющих хроматическую пару. Использование в объективе дифракционных оптических элементов позволило обеспечить исправление хроматических aberrаций в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм при использовании только двух оптических материалов: германия и селенида цинка.

Исходя из этого, в целях увеличения

Таблица 1

Спектральный диапазон	3...5 и 8...12
Фокусное расстояние, мм	70/200
Диафрагменное число	2
Линейное поле зрения, мм	9,6×7,2
Длина от первой поверхности до плоскости изображения, мм	215

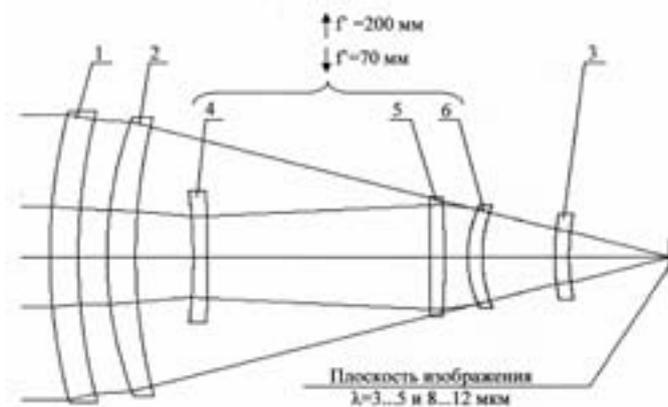


Рисунок 1

коэффициента пропускания объектива в рабочих спектральных диапазонах разработаны двухдиапазонные просветляющие покрытия для указанных материалов с областями пропускания 3,5 – 4,5 мкм и 8 – 10,3 мкм, оптимизированные для применения совместно с охлаждаемыми МФПУ.

В качестве пленкообразующих материалов для оптических покрытий инфракрасного объектива рассматривались Ge, ZnS, ZnSe, YF<sub>3</sub>. Оптические параметры указанных материалов представлены в таблице 2 [10].

Параметры, определяющие прочностные свойства пленок из указанных материалов, позволяют изготавливать на их основе покрытия, обладающие стойкостью

к внешним воздействиям, достаточной для использования в составе оптических элементов инфракрасного объектива. Кроме того, важным фактором, определяющим прочность покрытия, является согласованность составляющих его слоев по напряжениям. На основании большого количества выполненных в АО «НПО ГИПО» экспериментальных исследований в конструкциях оптических покрытий в качестве наиболее оптимальных выбраны сочетания материалов Ge - ZnS, Ge - ZnSe, ZnS - YF<sub>3</sub>.

В результате проведенных расчетов и их анализа выбраны следующие конструкции двухдиапазонных просветляющих покрытий:

- просветляющие покрытия для оптических элементов из Ge:

$$\text{Ge}-0,08\text{H}-2,00\text{B}-0,37\text{H}_1-0,15\text{B}-1,11\text{H}-0,30\text{H}_1-0,10\text{H}-0,30\text{H}_1; \quad (2)$$

- просветляющее покрытие для оптического элемента из ZnSe:

$$\text{ZnSe}-0,18\text{H}_1-0,85\text{H}-0,40\text{H}_1-0,10\text{H}-0,40\text{H}_1; \quad (3)$$

где B – слой Ge, B<sub>1</sub> – слой ZnSe, H – слой ZnS, H<sub>1</sub> – слой YF<sub>3</sub>. Числа перед символами материалов слоев указывают значения толщин слоев в долях λ<sub>0</sub>/4, где λ<sub>0</sub> – расчетная длина волны, равная 5 мкм.

Оптические параметры экспериментальных образцов с нанесенными на обе рабочие поверхности двухдиапазонными просветляющими покрытиями (2) и (3) приведены в таблице 3.

Таким образом, разработанные двухдиапазонные просветляющие покрытия для инфракрасного объектива позволяют в рабочих спектральных диапазонах увеличить

Таблица 2

Пленкообразующие материалы	Действительная часть показателя преломления n	Мнимая часть показателя преломления k	
		λ = 4 мкм	λ = 10 мкм
Ge	3,9	1,0·10 <sup>-7</sup>	1,4·10 <sup>-6</sup>
ZnSe	2,3	1,6·10 <sup>-8</sup>	4,4·10 <sup>-8</sup>
ZnS	2,1	2,0·10 <sup>-8</sup>	1,4·10 <sup>-5</sup>
YF <sub>3</sub>	1,42	2,0·10 <sup>-7</sup>	1,4·10 <sup>-5</sup>

Таблица 3

№№ конструкций просветляющих покрытий	Материал оптического элемента	Среднее пропускание в области спектра 3,5-4,5 мкм, %	Среднее пропускание в области спектра 8,0-10,3 мкм, %
1	Ge	96,5	94,7
2	ZnSe	97,2	94,9

пропускание каждой германиевой линзы примерно в 2 раза, а линзы из селенида цинка на 35%.

Применение интерференционного фильтра, блокирующего «паразитную засветку» в области спектральной чувствительности широкополосного фотоприемника улучшает соотношение «сигнал-шум». Предварительные расчеты показали, что для создания фильтра, имеющего две полосы пропускания в спектральных диапазонах 3,5...4,5 мкм и 8...10,3 мкм, и блокирующего излучение в спектральных областях с длинами волн короче 3 мкм, а также между полосами пропускания, необходимо, как минимум, две поверхности. В связи с недостаточной равномерностью спектральных характеристик фильтра по криволинейной поверхности линз, покрытия, образующие двухдиапазонный фильтр, наносились на дополнительную плоскопараллельную пластину из германия, устанавливаемую в области заднего отрезка инфракрасного объектива. Фильтр в этом случае можно разделить на две составные части, каждая из которых наносится на одну из рабочих поверхностей пластины. Необходимо учитывать, что введение дополнительного элемента приводит к некоторому снижению коэффициента пропускания объектива. Поэтому применение двухдиапазонного фильтра целесообразно в случае, если невозможно добиться необходимого соотношения «сигнал-шум» без оптической фильтрации излучения.

При разработке двухдиапазонного полосового фильтра синтезированы конструкции

двух типов фильтрующих покрытий для нанесения на обе стороны дополнительной плоскопараллельной пластины из Ge. Покрытие, предназначенное для нанесения на одну сторону пластины, представляет собой фильтр с двумя полосами пропускания в спектральных диапазонах 3,5...4,5 мкм и 8...10,3 мкм и областью блокировки в диапазоне 5,3...7,5 мкм. Коротковолновый блокирующий фильтр, предназначенный для нанесения на другую поверхность подложки, обеспечивает блокировку излучения в спектральном диапазоне 1,8...2,7 мкм и высокое пропускание в спектральных диапазонах 3,5...4,5 мкм и 5,3...7,5 мкм. В результате проведенных расчетов и их анализа выбраны покрытия, конструкции которых имеют вид:

- фильтр с двумя полосами пропускания:

$$\text{Ge } 1,42\text{H}_1 \text{ } 0,34\text{B } 1,33\text{H}_1 \text{ } (1,0\text{B } 1,0\text{H}_1)^6 \text{ } 1,10\text{B } 1,75\text{H}_1 \text{ } 0,63\text{H}' \quad (4)$$

- коротковолновый блокирующий фильтр:

$$\text{Ge } 0,1\text{H}_2 \text{ } 0,5\text{B } 0,26\text{H}_2 \text{ } (0,36\text{B } 0,36\text{H}_2)^4 \text{ } 0,5\text{B } 0,13\text{H}_2 \text{ } 0,76\text{B } 0,43\text{H}_2 \text{ } 0,2\text{B}1,1\text{H}_2 \quad (5)$$

В выражениях (4), (5) приняты следующие обозначения:

B – слой Ge, H<sub>1</sub> – слой ZnSe, H<sub>2</sub> – слой ZnS, H' – слой YF<sub>3</sub>. Числа перед обозначениями материалов слоев указывают значения толщин слоев в долях  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0$  – расчетная длина волны, равная 6,1 мкм.

Оптические параметры экспериментального образца двухдиапазонного фильтра, состоящего из покрытий (4) и (5), нанесенных на две стороны германиевой пластины, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Среднее значение коэффициента пропускания фильтра в рабочих областях, %		Среднее значение коэффициента пропускания фильтра в областях блокировки, %	
3,5 – 4,5 мкм	8,0 – 10,3 мкм	1,8 – 2,7 мкм	5,3 – 7,5 мкм
88,9	91,6	0,6	0,8

Разработанный двухдиапазонный фильтр увеличивает контраст изображения за счет улучшения соотношения «сигнал-шум» и может использоваться в случаях, когда необходима оптическая фильтрация излучения.

Разработанный двухспектральный инфракрасный объектив с дискретно изменяемым фокусным расстоянием может быть использован в комплексированных тепловизионных системах, предназначенных для работы одновременно (или попеременно) в окнах прозрачности атмосферы 3...5 мкм и 8...12 мкм.

*Список литературы:*

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. - М.: Университетская книга; Логос, 2007.-192 с.

2. Двухдиапазонная тепловизионная система для спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм/ Л.И. Горелик, Е.В. Дрогайцева, А.В. Полесский и др.// Прикладная физика.- 2011.- № 2.- С. 92-96.

3. Двухдиапазонный инфракрасный объектив/ Л.И. Горелик, А.В. Полесский, Н.А. Семченко и

др.// Успехи прикладной физики.- 2013.- Том 1, № 2.- С. 227-230.

4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Тенденции совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения:- Известия ВУЗов. Приборостроение.- 2012.- Том 55, № 5.- С. 56-63.

5. Двухспектральный инфракрасный объектив с вынесенной в пространство изображений апертурной диафрагмой // Патент RU 2 410 733 С1, 2011 г.

6. Dual-band, dual-focal-length, relayed refractive imager // Patent US 2005/0243411, A1, 2005.

7. Compact dual-field IR2-IR3 imaging system // Patent US 2010/0033578 A1, 2010.

8. Dual field of view multi-band optics // Patent US 2013/0044221 A1, 2013.

9. Двухспектральный инфракрасный объектив с дискретно изменяемым фокусным расстоянием //Патент RU 2 481 602, С1, 2013 г.

10. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения – Казань: Фэн, 2003.- 424 с.

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛЕНД

МИХАЛИЦЫН А.В.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*В статье описана методика, позволяющая оценивать эффективность бленд на стадии разработки компьютерных трехмерных моделей.*

**Ключевые слова:** бленда, коэффициент подавления, паразитная засветка.

## ВВЕДЕНИЕ

Поток излучения от боковых источников света, находящихся вне поля зрения оптического прибора, является паразитной засветкой, которая ухудшает качество изображения.

Бленда, как часть оптического прибора, предназначена для ослабления (подавления) прямого потока от боковых источников света. Подавление потока осуществляется путем многократного переотражения и поглощения излучения на внутренних поверхностях бленды.

При разработке бленд возникает необходимость оценки их эффективности по возможности подавления паразитной засветки.

В данной статье предлагается методика, которая позволяет оценивать эффективность бленд на стадии создания их трехмерной компьютерной модели.

Оценку эффективности предлагается проводить по коэффициенту подавления [1] при каждом угле отстройки от бокового источника света  $\varphi$ :

$$k_{\varphi} = \frac{E_D}{E_d}, \quad (1)$$

где  $E_D$  – средняя облученность входного отверстия бленды;  $E_d$  – средняя облученность первой линзы объектива.

## ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ БЛЕНДЫ

Методика оценки, предлагаемая в статье, рассмотрена на примере простой круговой бленды. Общий вид разреза трехмерной компьютерной модели бленды с положением первой линзы объектива в оправе приведен на рис. 1. Коэффициент поглощения покрытия внутренней поверхности бленды в расчетах принят равным 0,96.

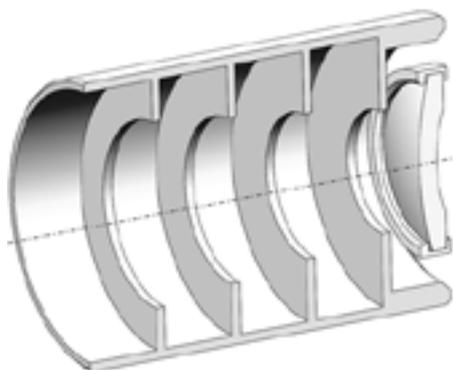
На сечении (рис. 2) показан угол  $\varphi$  засветки, подавляемой блендой [2].

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ

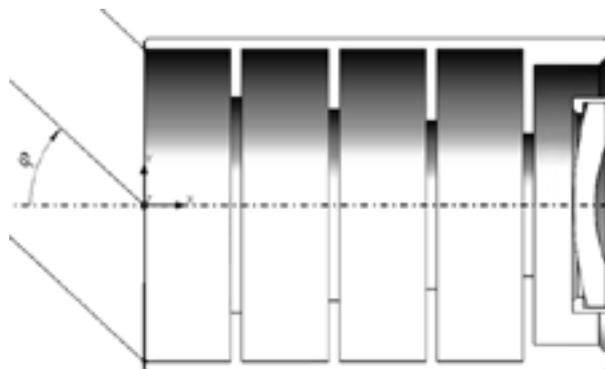
Для определения величин коэффициента подавления требуется определить источник бокового света. В рассматриваемой задаче таким источником выбрано Солнце. Облученность поверхности от Солнца на входе бленды 1367 Вт/м<sup>2</sup> [3].

Облученность первой поверхности входной линзы можно определить, если известен поток излучения, приходящего на данную поверхность.

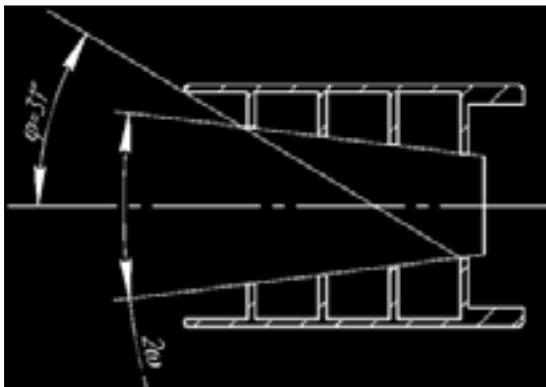
Расчет величины потока результирующего излучения приходящего на первую поверхность входной линзы объектива можно определить с помощью интегрированного в САПР SolidWorks 2014 расчетного модуля FlowSimulation.



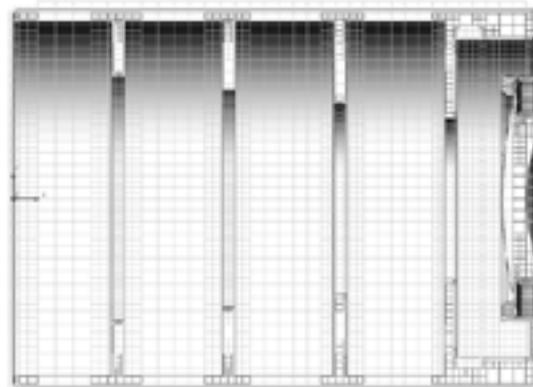
**Рисунок 1.**  
*Разрез модели бленды с первой линзой объектива*



**Рисунок 3.**  
*Направление изменения угла засветки*



**Рисунок 2.**  
*Сечение бленды и основные углы  
 $\varphi$  – угол засветки, подавляемой блендой;  
 $2\omega$  – угол поля зрения.*



**Рисунок 4.**  
*Вертикальное сечение конечно-элементной сетки*

Модуль FlowSimulation предназначен для расчета различных течений: двумерных и трехмерных, ламинарных, турбулентных и переходных, стационарных и нестационарных течений; позволяет решать задачи теплообмена за счет конвекции и излучения, а также учитывать воздействие внешних источников излучения.

В расчетном модуле FlowSimulation задается облученность поверхности от Солнца на входе бленды с указанием направления облученности и коэффициент поглощения внутренней поверхности бленды.

Направление изменения угла засветки широким параллельным пучком от Солнца приведено на рис. 3.

Поток результирующего излучения, проходящего на первую поверхность входной линзы объектива, в данной задаче определен для диапазона углов  $\varphi$  от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  с шагом  $5^\circ$ .

Модуль FlowSimulation основан на дискретном способе решения, поэтому при соз-

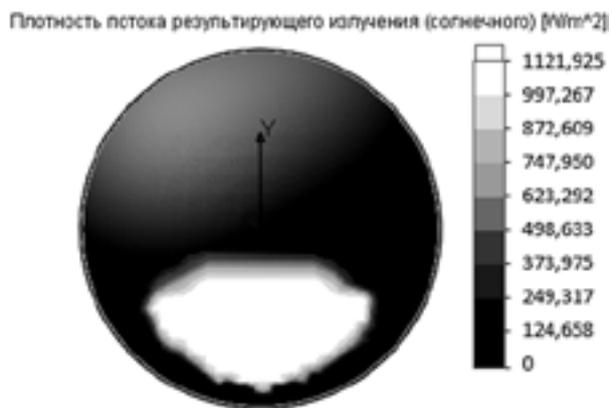
дании расчетной сетки необходимо контролировать точность прорисовки сеткой всех поверхностей бленды и линзы, так как более точное решение задачи требует более точного разрешения сеткой всех поверхностей.

Сечение в вертикальной плоскости конечно-элементной сетки, сгенерированной для решения рассматриваемой задачи, представлено на рис. 4.

Результаты решения для оговоренных углов представлены на рис. 5-11. Поток результирующего излучения выдается как отраженный от поверхности линзы, т.е. с обратным знаком. Для удобства восприятия на рисунках приведены абсолютные значения.

Суммарные значения потока результирующего излучения, проходящего на первую поверхность входной линзы, сведены в табл.

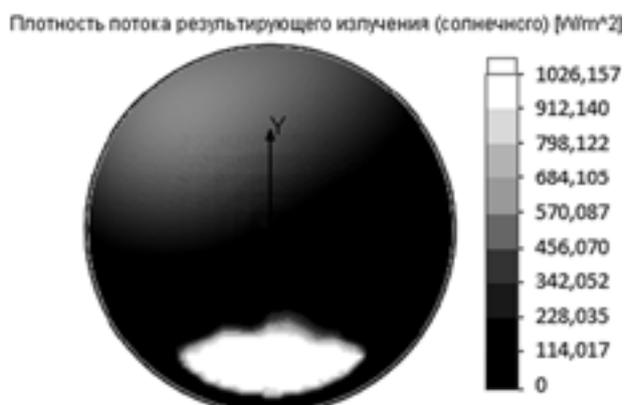
Значения коэффициента подавления для каждого угла определяются по формуле (1) (представлены в четвертом столбце табл.).



**Рисунок 5.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=20^\circ$*



**Рисунок 8.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=35^\circ$*



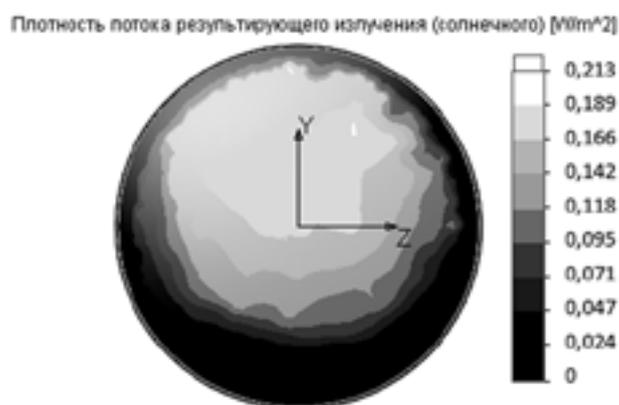
**Рисунок 6.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=25^\circ$*



**Рисунок 9.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=40^\circ$*



**Рисунок 7.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=30^\circ$*



**Рисунок 10.**  
*Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=45^\circ$*

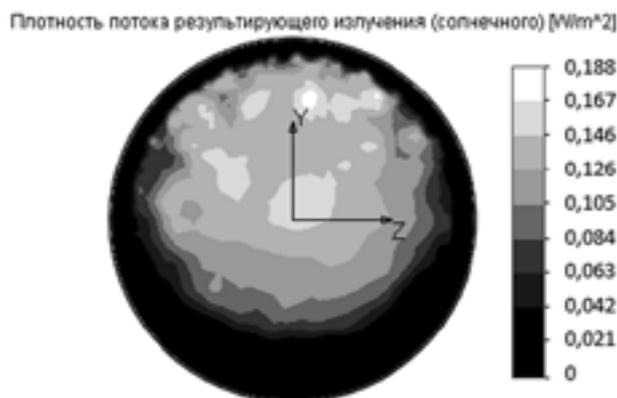


Рисунок 11.

Распределение плотности потока результирующего излучения для угла засветки  $\varphi=50^\circ$

Таблица 1.

Зависимость облученности первой поверхности входной линзы от угла засветки

Угол засветки, град	Поток результирующего излучения, Вт	Среднее значение облученности поверхности линзы, Вт/м <sup>2</sup>	Значение коэффициента подавления
20	$6,50 \cdot 10^{-2}$	216,667	6,31
25	$2,60 \cdot 10^{-2}$	86,667	15,77
30	$1,03 \cdot 10^{-4}$	0,343	$3,99 \cdot 10^3$
35	$5,30 \cdot 10^{-5}$	0,177	$7,72 \cdot 10^3$
40	$3,11 \cdot 10^{-5}$	0,104	$1,31 \cdot 10^4$
45	$2,73 \cdot 10^{-5}$	0,091	$1,50 \cdot 10^4$
50	$2,34 \cdot 10^{-5}$	0,078	$1,75 \cdot 10^4$

Анализ рис. 5 – 11 и таблицы показывает, что подавление данной блендой паразитной засветки на три порядка происходит уже с углов, превышающих  $30^\circ$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика позволяет оценивать эффективность бленд по уровню подавления паразитной засветки.

Применение данной методики позволяет оценивать и сравнивать бленды на стадии разработки компьютерных трехмерных моделей и разработать наиболее оптимальную конструкцию для каждой из решаемых задач.

#### Список литературы:

1. Филиппова О.В., Бессонов Р.В., Аванесов Г.А. Оптимизация конструкции светозащитной бленды прибора звездной ориентации// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – М.: Институт космических исследований РАН, 2014. – т.11. №2. С.165-174.
2. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с., ил.
3. Алексеев Г.В. Метеорологические и геофизические исследования – М.:Paulsen, 2011. – 620 с.

# НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ЗЕРКАЛА КОНТРЕФЛЕКТОРА ТЕЛЕСКОПА «МИЛЛИМЕТРОН» НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСФЕРО-ГОЛОГРАММНОГО ПРОБНОГО СТЕКЛА

ЛУКИН А.В., МЕЛЬНИКОВ А.Н., СКОЧИЛОВ А.Ф.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*Рассматриваются основные аспекты технического предложения, открывающего возможность исследования термодформаций зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметронтрон» на основе использования асферо-голограммного пробного стекла из церодура в условиях термобарокамеры при изменении температуры в диапазоне от 300 до 4 К.*

**Ключевые слова:** зеркало контррефлектора, интерферометрический контроль, асферическое пробное стекло, голограмма-осветитель, термобарокамера.

Известно, что зеркало контррефлектора (ЗКР) телескопа «Миллиметронтрон» космического базирования задумано монолитным и жестким; следовательно, активная коррекция его рабочей выпуклой гиперболической поверхности в криогенных условиях чрезвычайно затруднена в отличие от главного параболического составного зеркала этого телескопа, в конструкции которого предполагается наличие системы пьезокерамических актуаторов с обратной связью. Также весьма важен этап выбора материала ЗКР, определяющий особенности как технологии его изготовления, так и процесса эксплуатации. В настоящее время разработчики телескопа отдают предпочтение карбиду кремния, как имеющему наиболее высокое значение коэффициента Максудова [1].

Следовательно, при изготовлении ЗКР в нормальных (цеховых) условиях необходимо придать такую форму его рабочей поверхности, чтобы при охлаждении до штатной криогенной температуры (~ 4 К) она приобрела бы заданную гиперболическую форму. В связи с этим на первых этапах работы требуется

выявить закономерности и воспроизводимость изменения формы рабочей поверхности (термодформации) ЗКР при изменении температуры в интервале от ~ 300 до ~ 4 К.

Важнейшей проблемой в данном случае является сложность обеспечения точного и объективного контроля изменения формы ЗКР из карбида кремния, вызванного термодформациями в процессе охлаждения в термобарокамере, имитирующей космические условия (см., например, [2]).

В работе [3] предлагаются интерферометрические схемы контроля для выполнения лишь аттестационного контроля формы рабочей поверхности ЗКР на основе применения двух сфер Хиндла и «сшивания» результатов этих двух этапов контроля – сначала периферийной части ЗКР, а затем – его центральной части. Очевидным недостатком такого подхода является невозможность проведения контроля формы рабочей поверхности ЗКР в процессе его формообразования.

В работе [4] предложено контролировать форму рабочей выпуклой гиперболической поверхности ЗКР в схеме неравноплечевого ла-

зерного интерферометра типа Тваймана-Грина с использованием в качестве оптического компенсатора синтезированной голограммы, выполненной на плоско-выпуклой подложке из церодура. Это открывает возможность применения интерферометра как в цеховых условиях, так и при криогенных температурах. Однако в этом случае синтезированная голограмма должна иметь световой диаметр порядка 1 м, что потребует разработки и изготовления новой круговой делятельной машины.

Решение этой важнейшей проблемы предложено осуществить на основе использования асферического пробного стекла с вогнутой рабочей гиперболической поверхностью из церодура [5].

На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема этого интерферометра.

Интерферометр подобного типа, как известно, обладает чрезвычайно высокой помехоустойчивостью к внешним механическим воздействиям и низкой чувствительностью к дефектам оптических элементов [6]. Выполнение же пробного стекла из оптического материала «церодур» фирмы «SCHOTT AG» (Германия) обеспечит повышенную устойчивость формы рабочей поверхности пробного стекла к температурным изменениям в указанном выше температурном диапазоне. В качестве осветительного объектива предлагается применить осевую синтезированную голограмму, кольцевая микроструктура которой выполняется непосредственно на задней поверхности подложки

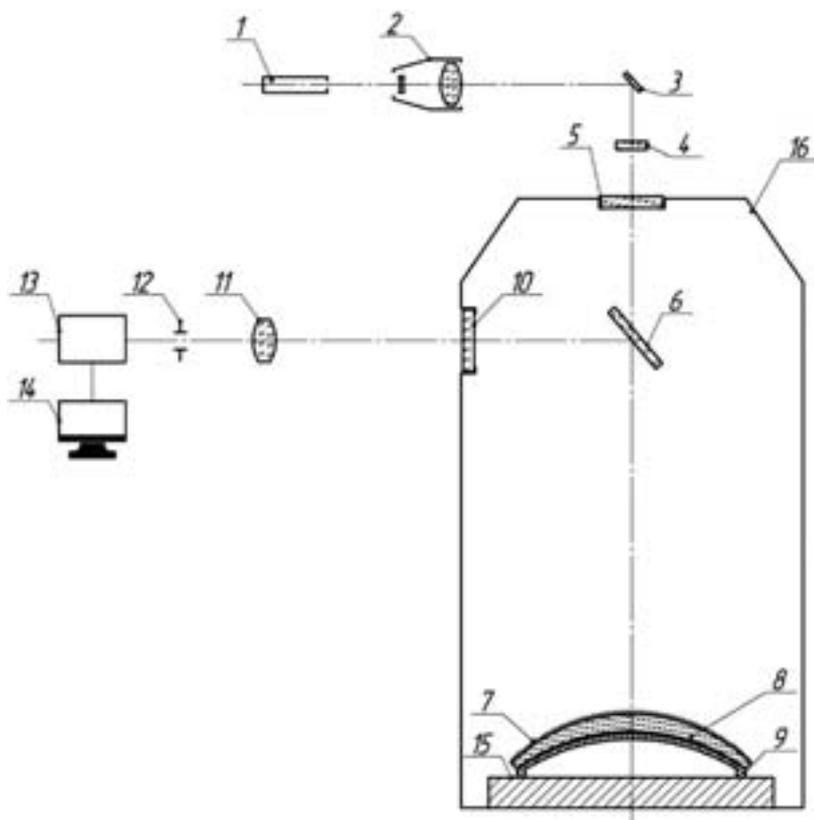


Рисунок 1.

**Принципиальная оптическая схема интерферометра**

**для исследования термодформаций зеркала контррефлектора:**

- 1 – лазер; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – поворотное зеркало; 4 – рассеиватель; 5, 10 – иллюминаторы термобарокамеры; 6 – светоделитель; 7 – рельефно-фазовая структура осевой синтезированной голограммы-осветителя; 8 – асферо-голограммное пробное стекло из церодура (световой диаметр ~ 580 мм); 9 – выпуклое гиперболическое зеркало контррефлектора космического телескопа «Миллиметрон» облегченной конструкции из карбида кремния (световой диаметр 542 мм); 11 – сопрягающий объектив; 12 – пространственный фильтр; 13 – телевизионная камера; 14 – персональный компьютер; 15 – термостабилизированное основание; 16 – термобарокамера, имитирующая космические условия

пробного стекла (сферической или плоской); это делает интерферометр еще более помехоустойчивым и компактным.

Для случая выпуклой сферической (радиус кривизны 275 мм) задней поверхности пробного стекла 8 осевая синтезированная голограмма-осветитель 7 будет иметь световой диаметр  $\sim 580$  мм и максимальную пространственную частоту в диапазоне от  $\sim 790$  до  $\sim 880$  мм<sup>-1</sup> в зависимости от расстояния  $d$  (диапазон изменения  $d$  от 1500 до 3000 мм), измеряемого от «точечного» источника излучения до голограммы-осветителя.

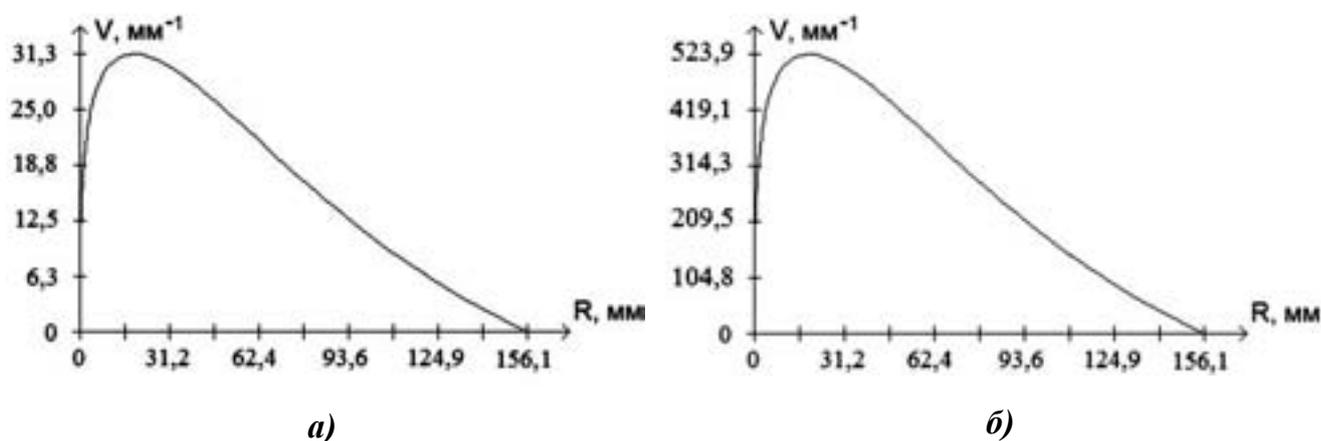
Особо следует отметить, что для такого типа интерферометра характерны весьма умеренные требования к качеству элементов его формирующей оптики, включая в данном случае и осевую синтезированную голограмму-осветитель.

Вогнутую гиперболическую поверхность асферо-голограммного пробного стекла предлагается контролировать в автоколлимационной схеме неравноплечевого интерферометра типа Тваймана-Грина.

На начальной стадии процесса формообразования вогнутой гиперболической поверхности, в силу её значительных отступлений от расчетных значений, технологический

лазерно-голографический контроль формы этой поверхности целесообразно проводить на лазерной длине волны 10,6 мкм в голографическом инфракрасном интерферометре [7]. В этом случае будет использована осевая синтезированная голограмма-компенсатор (нуль-корректор) со световым диаметром 312 мм и расчетной частотной характеристикой, представленной на рис. 2а. На финишной же стадии процесса формообразования этой поверхности её технологический и аттестационный лазерно-голографический контроль целесообразно выполнять на лазерной длине волны 632,8 нм, применяя интерферометр типа Тваймана-Грина, собранный на голографической установке типа АГ-2 [8]. Будет изготовлена осевая синтезированная голограмма-компенсатор со световым диаметром 312 мм, расчетная характеристика которой представлена на рис. 2б.

В настоящее время прорабатывается возможность применения фотоприёмных устройств на основе неохлаждаемых микроболометрических модулей (см., например, [9]) для регистрации интерференционных картин при использовании лазерных источников излучения видимого и инфракрасного диапазонов спектра.



**Рисунок 2.**

*Параметры дифракционной структуры осевых синтезированных голограмм-компенсаторов для контроля вогнутой гиперболической поверхности асферо-голограммного пробного стекла в схеме интерферометра типа Тваймана-Грина*

*(R – радиус голограммы, V – пространственная частота):*

- а) – на рабочей длине волны 10,6 мкм; б) – на рабочей длине волны 632,8 нм;  
расстояние от «точечного» источника света до голограммы 158,4 мм;  
расстояние от голограммы до вершины гиперболической поверхности 275 мм*

В дальнейшем в ходе выполнения комплекса расчетно-теоретических и экспериментальных работ на уменьшенных моделях ЗКР диаметром до 200 мм в указанном большом диапазоне изменения температуры необходимо выявить и уточнить основные факторы, сопровождающие изменение геометрии этого зеркала как функции изменения температуры.

Таким образом, рассмотренный интерферометр на основе использования асферо-голограммного пробного стекла из церодура открывает возможность выявления закономерностей возникновения термдеформаций ЗКР из карбида кремния при переходе от цеховых температур к криогенным в условиях термобарокамеры. В этом случае асферо-голограммное пробное стекло имеет световой диаметр, практически равный световому диаметру ЗКР, и реализация технического решения, представленного в настоящей статье, возможна на действующем технологическом оборудовании в Государственном институте прикладной оптики.

*Список литературы:*

1. Электронный ресурс <http://millimetron.ru> (Астрокосмический центр ФИАН, г. Москва).
2. Электронный ресурс <http://blms.ru/space>.
3. Капустин А.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Контроль формы поверхности вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрон» // Электронный журнал «Наука и образование». МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2015. – № 5. – С. 297 – 308.
4. Лукин А., Мельников А., Скочиллов А. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы // Фотоника. – 2016. – № 5. – С. 44 – 48.
5. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочиллов А.Ф. Лазерный интерферометр с асферо-голограммным пробным стеклом для термобарокамеры // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84. – № 3. – С. 65 – 66.
6. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А. Байгожин и др.; Под ред. М.А. Окатова. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
7. Дучицкий А.С., Лукин А.В., Маврин С.В., Мельников А.Н. Лазерно-голографический комплекс для технологического и аттестационного контроля оптических элементов и объективов в инфракрасном диапазоне спектра 3 – 12 мкм // Прикладная физика. – 2008. – № 3. – С. 125 – 127.
8. Белозёров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мельников А.Н. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Часть I // Фотоника. – 2014. – № 4. – С. 12 – 32.
9. Электронный ресурс [http://astrohn.ru/files/Catalogue\\_Detector.pdf](http://astrohn.ru/files/Catalogue_Detector.pdf) (каталог продукции АО «ОКБ «АСТРОН», г. Лыткарино, Московская обл.).

# ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

ОВСЯННИКОВ В.А., ОВСЯННИКОВ Я.В., ФИЛИППОВ В.Л.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*Изложена методика оценки среднеквадратических отклонений результатов совместного измерения посредством тепловизионных приборов перепадов радиационных температур протяженного объекта и фона и размеров объекта. С учетом специфики определения пороговой чувствительности квантовых матричных фотоприемных устройств, используемых в современных несканирующих приборах, разработана процедура расчета их разности температур, эквивалентной шуму, в реальных условиях применения и выполнен анализ этой разности в различных ситуациях.*

**Ключевые слова:** тепловизионный прибор, измерение параметров объектов.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения требований к основным техническим параметрам современных и перспективных образцов наблюдательных тепловизионных приборов (ТВП), а также для прогнозирования их эффективности при обнаружении и распознавании объектов местности необходимо соответствующее фоно-целевое информационное обеспечение, которое заключается в предоставлении информации об объектах техники, промышленности, инфраструктуры и т.д. и о сопутствующих им фонах. Важнейшим компонентом этого обеспечения является база исходных данных по демаскирующим признакам объектов – разностям радиационных температур объектов и фонов и размерам объектов, достаточно достоверные сведения о которых могут быть оперативно получены посредством измерительных ТВП воздушного и наземного базирования, служащих для бесконтактного наблюдения, измерения и регистрации пространственного распределения радиационной температуры объек-

тов, находящихся в поле зрения приборов. Измерение отмеченных параметров объектов необходимо и при решении многих задач дистанционного зондирования и контроля: теплового картографирования местности, ледовой разведки, теплового неразрушающего контроля и диагностики состояния зданий, сооружений, дымовых труб, котельных, трубопроводов и др. В связи с этим предметом настоящей статьи является анализ достижимой точности подобных измерений, определяемой соответствующими значениями среднеквадратического отклонения (СКО) их результатов.

## ОБОСНОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим методику оценки СКО средней разности радиационных температур объекта и фона  $\Delta T_r$ , К, в спектральных рабочих диапазонах ТВП  $\Delta \lambda = 3-5$  мкм и  $\Delta \lambda = 8-12$  мкм. Для протяженного объекта, размеры которого значительно превышают размеры элемента разложения ТВП, эта разность определяется формулой:

$$\Delta T_R = \Delta T'_R / \tau_a \quad (1)$$

где  $\Delta T'_R$  – разность радиационных температур объекта и фона, К, приведенная к ТВП, учитывающая коэффициент пропускания атмосферы  $\tau_a$  в диапазоне  $\Delta\lambda$  на трассе до объекта.

С учетом изменчивости и особенностей вертикальной стратификации атмосферы

$$\tau_a = \exp(-L); \quad L = L_p + L_n; \quad L_p = \beta_p K_p D;$$

$$\beta_p = \begin{cases} (2,26 - 0,49 \ln S_M) / S_M & (\Delta\lambda = 3 - 5 \text{ мкм}); \\ (1,66 - 0,35 \ln S_M) / S_M & (\Delta\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}); \end{cases} \quad (2)$$

$$L_n = \begin{cases} 0,145(K_n D)^{0,53} \ln(W/217) + 1,19(K_n D)^{0,46} & (\Delta\lambda = 3 - 5 \text{ мкм}); \\ [0,049 + 0,015W - 0,011 \ln(K_n D)](K_n D)^{0,88} & (\Delta\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}); \end{cases}$$

$$K_p = h_{po}[1 - \exp(-H/h_{po})]/H; \quad K_n = h_{no}[1 - \exp(-H/h_{no})]/H;$$

$$h_{po} = 0,78 + 0,038S_M; \quad h_{no} = 2,2 \text{ км},$$

где  $D$  – длина наклонной трассы, км;  $H$  – высота расположения ТВП, км;  $L_p, L_n$  – оптическая толщина атмосферы, обусловленная аэрозольным рассеянием и поглощением излучения парами воды соответственно;  $\beta_p$  – показатель аэрозольного рассеяния, км<sup>-1</sup>;  $K_p, K_n$  – коэффициенты приведения наклонной трассы к эквивалентной приземной горизонтальной по соответствующим факторам ослабления излучения; для приземных горизонтальных трасс  $K_p = K_n = 1$ ;  $h_{po}, h_{no}$  – параметры экспоненциальной аппроксимации вертикальных профилей показателей аэрозольного рассеяния и поглощения излучения парами воды соответственно, км;  $W$  – абсолютная влажность воздуха в приземном слое атмосферы, г/м<sup>3</sup>;  $S_M$  – метеорологическая дальность видимости (МДВ), км.

Для оценки абсолютной влажности воздуха  $W$  известна аппроксимация [4]:

$$W = \frac{2,17 \cdot 10^{-2} f_{отн} \exp(-0,00031t_b^2 + 0,0738t_b + 6,41)}{t_b + 273}$$

где  $f_{отн}$  – относительная влажность воздуха, %;  $t_b$  – температура воздуха, °С.

СКО  $\sigma_{\Delta T}$  оценки величины  $\Delta T'_R$  по (1), равно:

оценку ее коэффициентов пропускания, вообще говоря, рекомендуется выполнять с использованием уточненных специализированных моделей и программ (например, [1,2]). Однако для простоты изложения и оперативности практической реализации мы здесь воспользуемся приближенной методикой, согласно которой для наклонных трасс и наземного объекта значение  $\tau_a$  составляет [3]:

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T_R \sqrt{(\sigma_1 / \Delta T'_R)^2 + (\sigma_2 / \tau_a)^2} \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – СКО оценок значений  $\Delta T'_R$  и  $\tau_a$  соответственно.

Согласно [5], при достаточно узком диапазоне регистрируемой разности температур, имеющем место при измерении разности радиационных температур уже обнаруженного низкотемпературного объекта и фона, потенциально достижимое значение СКО  $\sigma_1$  определяется в основном шумом ТВП, и его можно считать равным разности температур, эквивалентной шуму  $\Delta T, K$ , соответствующей данной температуре фона, поэтому в (3) имеем:  $\sigma_1 = \Delta T$ .

При оценке СКО  $\sigma_2$  коэффициента пропускания атмосферы примем, что это СКО определяется только погрешностью оценки наиболее изменчивого, аэрозольного, компонента оптической толщины атмосферы, в том числе погрешностью оценки собственно МДВ. Поскольку МДВ нередко определяется визуально на основе обычного житейского понятия «дальность видения»  $S_b$ , которая связана с МДВ  $S_m$  ориентировочным соотношением [6]  $S_m = (1,3 \pm 0,3)S_b$ , относительное

СКО  $\sigma_3/S_m$  оценки МДВ допустимо считать близким к  $(0,3/3)/1,3 = 0,08$ . Кроме того, самой модели оптической толщины атмосферы  $L_p$  присуще относительное СКО  $\sigma_4/L_p$  оценки этой толщины, приблизительно равное 0,05 [7]. Тогда, согласно (2), для СКО  $\sigma_2$ , постулируя независимость соответствующих погрешностей, можно записать выражение:

$$\sigma_2 = \tau_a \beta_p DK_p \sqrt{A^2 (\sigma_3/S_m)^2 + (\sigma_4/\beta_p)^2};$$

$$A = [(d\beta_p/dS_m)S_m/\beta_p] \quad (4)$$

Как показывает анализ, параметр  $A$  в (4) с повышением МДВ несколько возрастает и для типовых условий измерения при  $S_m = 10-20$  км и обоих спектральных диапазонов находится в пределах  $A = 1,4-1,5$ , поэтому вместо (3) получаем:

$$\sigma_{\Delta T} = \Delta T_R \sqrt{(\Delta T/\Delta T'_R)^2 + (0,13\beta_p DK_p)^2} \quad (5)$$

Следовательно, при больших значениях дальности до объекта погрешность оценки разности  $\Delta T_R$  определяется главным образом неточным знанием оптической толщины атмосферы, а при малых – разностью температур, эквивалентной шуму. В связи с этим разовьем далее методику расчета значения  $\Delta T$  для современных несканирующих ТВП, использующих квантовые матричные фотоприемные устройства (ФПУ), которая имеет и самостоятельное практическое значение.

Разность температур, эквивалентная шуму  $\Delta T$ , в (5) составляет [3]:

$$\Delta T_\phi = \frac{\Delta T_{\phi 0} \sqrt{BM_\Sigma}}{q \sqrt{B_0 M_0}}; \quad \Delta T_a = \frac{\Delta T_{a0} B}{q B_0}; \quad (7)$$

$$M_\Sigma = \int_{\Delta\lambda} M_\Sigma(\lambda) S(\lambda) d\lambda; \quad M_0 = \int_{\Delta\lambda} M_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda;$$

$$\Delta T_{a0} = (\Delta T_{\text{ФПУ}}^2 - \Delta T_{\phi 0}^2)^{1/2}; \quad B = \frac{4}{\omega^2} + 1; \quad B_0 = \frac{4}{\omega_0^2} + 1; \quad q = \frac{Y \sqrt{t_n/t_{n0}}}{Y_0}; \quad (8)$$

$$Y = \frac{1,44 \cdot 10^4 \tau_0}{T^2} \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \lambda; \quad Y_0 = \frac{1,44 \cdot 10^4}{T_0^2} \int_{\Delta\lambda} M_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \lambda,$$

$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_B^2 + \Delta T_\Pi^2}; \quad \Delta T_B = \sqrt{\Delta T_\phi^2 + \Delta T_a^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta T_B, \Delta T_\Pi$  – разность температур, эквивалентная временному и пространственному шуму соответственно, К;  $\Delta T_\phi, \Delta T_a$  – разность температур, эквивалентная внешнему фотонному и внутреннему аппаратурному шуму соответственно, К.

В описаниях современных матричных ФПУ их пороговая чувствительность задается разностью температур, эквивалентной временному шуму  $\Delta T_{\text{ФПУ}}$ , определенной в нормированных условиях: в отсутствие объектива, но со встроенным охлаждаемым спектральным фильтром для спектрального рабочего диапазона  $\Delta\lambda$ , для фона – черного тела с температурой  $T_0$  (обычно 300 К) и соответствующей эффективной энергетической светимостью  $M_0$ , Вт/см<sup>2</sup>, относительного отверстия охлаждаемой диафрагмы  $\omega_0$  (обычно 1:2), времени накопления  $t_{n0}$ , с, и уровня заряда емкости устройства считывания  $\alpha_0$  (обычно 0,5). Тогда, вычлняя из величины  $\Delta T_{\text{ФПУ}}$  составляющую, обусловленную фотонным шумом, можно показать, что для эффективной энергетической светимости  $M_\Sigma$  окружающего ФПУ пространства, зависящей, в основном, от температуры фона  $T, K$ , относительного отверстия охлаждаемой диафрагмы  $\omega$ , совпадающего с относительным отверстием объектива, и времени накопления зарядов  $t_n, c$ , значения разности температур, эквивалентной фотонному и аппаратурному шуму, будут определяться формулами:

где  $\Delta T_{\text{ф0}}$ ,  $\Delta T_{\text{а0}}$  – разность температур, эквивалентная фотонному и аппаратурному шуму соответственно, для нормированных условий, К;  $M_{\Sigma}(\lambda)$ ,  $M_0(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  – спектральная плотность суммарной энергетической светимости окружающего пространства и черного тела с температурой  $T_0$  и  $T$  соответственно, Вт/(см<sup>2</sup>·мкм);  $S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность ФПУ;  $\tau_0$  – среднее значение коэффициента пропускания объекта в спектральном рабочем диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Время накопления зарядов  $t_{\text{н}}$  в (8) выбирается таким, чтобы избежать чрезмерного наполнения зарядовой емкости устройства считывания:

$$t_{\text{н}} = \min(\alpha_{\text{м}} / F, \alpha B M_0 t_{\text{н0}} / \alpha_0 B_0 M_{\Sigma}) \quad (9)$$

где  $F$  – частота кадров, Гц;  $\alpha_{\text{м}}$  – отношение времени накопления зарядов при микро-сканировании к таковому в его отсутствие;

обычно для четырехпозиционного микро-сканирования  $\alpha_{\text{м}} = 0,1-0,15$  (в отсутствие микро-сканирования  $\alpha_{\text{м}} = 1$ );  $\alpha$  – предельно допустимый уровень заряда емкости считывающего устройства, определяемый в том числе требованиями линейности передаточной функции сигнала (обычно  $\alpha = 0,5-0,7$ ).

При этом смаз изображения, возникающий при движении носителя ТВП, не должен быть заметен на изображении, для чего необходимо, чтобы этот смаз составлял не более половины пиксела [8], соответствующего элементарному полю зрения ТВП  $\delta_0$ , мрад. Поэтому максимально допустимая скорость  $V$ , км/с, этого движения равна:

$$V = 0,5 H \delta_0 / t_{\text{н}} \sin^2 \psi$$

где  $\psi$  – угол места объекта (от горизонта), град.

Величина  $\Delta T_{\text{ф0}}$  в (8) составляет [3]:

$$\Delta T_{\text{ф0}} = \frac{B_0 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{S_{\text{п}} D_m^* Y_0}} = \frac{\sqrt{hc M_0 B_0}}{Y_0 \sqrt{\lambda_m \eta_m t_{\text{н0}} S_{\text{п}}}} \approx \frac{\lambda_0 T_0^2 \sqrt{hc B_0}}{1,44 \cdot 10^4 \sqrt{\lambda_m \eta_m t_{\text{н0}} M_0 S_{\text{п}}}}; \quad (10)$$

$$D_m^* = \frac{\sqrt{\lambda_m \eta_m B_0}}{\sqrt{2hc M_0}}; \quad \Delta f = \frac{1}{2t_{\text{н0}}}$$

где  $\Delta f$  – шумовая полоса пропускания, Гц;  $D_m^*$  – удельная обнаружительная способность ФПУ для режима ограничения фоном на длине волны  $\lambda_m$ , мкм, на которой  $S(\lambda m) = \max$ , см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт;  $\eta_m$  – квантовая эффективность ФПУ на длине волны  $\lambda_m$ ;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^{14}$  мкм/с – скорость света;  $S_{\text{п}}$  – площадь элемента ФПУ, см<sup>2</sup>;  $\lambda_0$  – средняя длина волны диапазона  $\Delta\lambda$ , мкм.

Вместо значения  $\eta_m$  здесь можно также использовать интегральную квантовую эффективность ФПУ  $\eta$ , определяемую как

$$\eta = \frac{\int_{\Delta\lambda} Q_0(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} Q_0(\lambda) d\lambda}$$

где  $Q_0(\lambda)$  – спектральная плотность потока фотонов от черного тела с температурой  $T_0$ , фотон/(см<sup>2</sup>·с·мкм);  $\eta(\lambda)$  – спектральная квантовая эффективность ФПУ.

Тогда, учитывая, что

$$Q_0(\lambda) = \lambda M_0(\lambda) / hc; \quad S(\lambda) = \lambda \eta(\lambda) / \lambda_m \eta_m,$$

получаем соотношение:

$$\lambda_m \eta_m M_0 = \eta \int_{\Delta\lambda} \lambda M_0(\lambda) d\lambda$$

В некоторых случаях в описаниях матричных ФПУ вместо значения  $\Delta T_{\text{ФПУ}}$  приводится величина пороговой облученности (облученности, эквивалентной временному шуму) ФПУ  $\Delta E_{m0}$ , Вт/см<sup>2</sup>, на длине волны  $\lambda_m$ . Соотношение между этими параметрами ФПУ имеет следующий вид:

$$\Delta T_{\text{ФПУ}} = \Delta E_{m0} B_0 / Y_0$$

Если вместо  $\Delta E_{m0}$  известно значение интегральной пороговой облученности ФПУ  $\Delta E_0$ , Вт/см<sup>2</sup>, соответствующей нормированной температуре фона  $T_0$ , то величина  $\Delta T_{\text{ФПУ}}$  вычисляется по формуле:

$$\Delta T_{\text{ФПУ}} = \Delta E_0 B_0 M_0 / \sigma T_0^4 Y_0,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$  Вт/(см<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для ФПУ, работающего в диапазоне 3-5 мкм, в котором излучение фона сравнительно невелико, время накопления  $t_{н0}$  в (8)-(10) в нормированных условиях нередко составляет  $t_{н0} = 1/F_0$ , где  $F_0$  – частота кадров в тех же условиях, Гц. Однако для ФПУ диапазона 8-12 мкм значение  $t_{н0}$ , как правило, ограничивается не частотой кадров, а зарядовой емкостью устройства считывания  $N_m$ , электрон, поэтому оно определяется выражением:

$$t_{н0} = \alpha_0 hc B_0 N_m / \lambda_m \eta_m S_{п} M_0$$

Для современных ФПУ с кремниевыми считывающими устройствами значение  $N_m$  достигает  $4 \cdot 10^7$  электрон, что близко к теоретическому пределу [9].

Тогда вместо (9) и (10) получаем следующие соотношения для допустимого времени накопления  $t_n$  и разности температур, эквивалентной фотонному шуму  $\Delta T_{\phi 0}$ , соответственно:

$$t_n = \min(\alpha_m / F, \alpha hc B N_m / M_{\Sigma} \lambda_m \eta_m S_{п});$$

$$\Delta T_{\phi 0} = \frac{M_0}{Y_0 \sqrt{\alpha_0 N_m}} \approx \frac{\lambda_0 T_0^2}{1,44 \cdot 10^4 \sqrt{\alpha_0 N_m}}$$

При  $M_{\Sigma}(\lambda) = M_0(\lambda) = M(\lambda)$  соответствующая разность температур, эквивалентная временному шуму  $\Delta T_v$ , определяемая по (6), становится равной паспортному значению  $\Delta T_0$ , по которому обычно и сравнивается пороговая чувствительность различных ТВП. При этом

$$M_{\Sigma} = \tau_n \tau_o K_n M_{\phi a} + \varepsilon_n \tau_o M_n + (1 - \tau_o + \rho_n \tau_o) M_k;$$

$$K_n \approx \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) d\lambda; \quad M_n = \int_{\Delta\lambda} M_n(\lambda) S(\lambda) d\lambda; \quad M_k = \int_{\Delta\lambda} M_k(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где  $M_k(\lambda)$ ,  $M_n(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости черного тела с температурой  $T_k$  и  $T_n$  соответственно, Вт/(см<sup>2</sup>мкм);  $M_{\phi a}$  – совместная энергетическая светимость фона и атмосферы, Вт/см<sup>2</sup>, в диапазоне  $\Delta\lambda$ , воспринимаемая ТВП;  $K_n$  – коэффициент использования излучения фона и атмосферы;  $\tau_n$ ,  $\varepsilon_n$ ,  $\rho_n$  – коэффициент пропускания, излучения и отражения иллюминатора соответственно в диапазоне  $\Delta\lambda$ .

Для этих коэффициентов известны следующие выражения, учитывающие многократные

в (8) следует принять  $Y/Y_0 = \tau_o$ .

Разность температур, эквивалентная пространственному шуму  $\Delta T_n$ , для фотонного ФПУ равна [3]:

$$\Delta T_n = \lambda_0 T^2 \sigma_{отн} / 1,44 \cdot 10^4 \tau_o \quad (11)$$

где  $\sigma_{отн}$  – относительное СКО остаточного разброса чувствительности элементов ФПУ (обычно  $\sigma_{отн} = 10^{-5} - 10^{-3}$ ).

Отметим, что зарядовая емкость  $N_m$ , определяющая максимальное время накопления зарядов  $t_n$ , обычно является основным фактором, ограничивающим разность температур, эквивалентную временному шуму, несканирующих ТВП [9], и это обстоятельство, в частности, радикально изменяет традиционный вид зависимости значения  $\Delta T_v$  от температуры фона.

В общем случае, в реальных условиях применения ТВП, значение эффективной энергетической светимости  $M_{\Sigma}$  в (7) зависит от эффективной энергетической светимости не только внешних источников излучения (фон и атмосфера), но и внутренней полости ТВП  $M_k$  и  $M_n$ , определяемых соответственно температурой корпуса (а значит, объектива) ТВП  $T_k$ , К, и иллюминатора (защитного окна)  $T_n$ , К, температура которого для ТВП воздушно-го базирования может быть отличной от  $T_k$ . При этом значение  $M_{\Sigma}$ , с учетом результатов [10], записывается в виде:

$$M_{\Sigma} = \tau_n \tau_o K_n M_{\phi a} + \varepsilon_n \tau_o M_n + (1 - \tau_o + \rho_n \tau_o) M_k; \quad (12)$$

$$K_n \approx \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) S(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) d\lambda; \quad M_n = \int_{\Delta\lambda} M_n(\lambda) S(\lambda) d\lambda; \quad M_k = \int_{\Delta\lambda} M_k(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

внутренние отражения излучения [10]:

$$\tau_n = \frac{\tau_1 \tau_2 \alpha_n}{1 - \rho_1 \rho_2 \alpha_n^2};$$

$$\varepsilon_n = \tau_2 (1 - \alpha_n) \frac{1 + \rho_1 \alpha_n}{1 - \rho_1 \rho_2 \alpha_n^2};$$

$$\rho_n = \rho_2 + \frac{\tau_2 \rho_1 \alpha_n^2}{1 - \rho_1 \rho_2 \alpha_n^2};$$

$$\tau_1 = 1 - \rho_1; \quad \tau_2 = 1 - \rho_2;$$

$$\alpha_n = \exp(-\sigma_n d),$$

где  $\tau_1, \tau_2$  – коэффициент пропускания внешней и внутренней поверхности иллюминатора соответственно;  $\rho_1, \rho_2$  – коэффициент отражения внешней и внутренней поверхности иллюминатора соответственно;  $\alpha_{и}$  – коэффициент поглощения иллюминатора;  $\sigma_{и}$  – показатель поглощения материала иллюминатора,  $\text{см}^{-1}$ ;  $d$  – толщина иллюминатора,  $\text{см}$ .

При этом  $\tau_{и} + \varepsilon_{и} + \rho_{и} = 1$ . Для ТВП без иллюминатора  $\tau_{и} = 1, \varepsilon_{и} = \rho_{и} = 0$ .

Значения коэффициентов отражения  $\rho_1, \rho_2$  поверхностей иллюминатора с просветляющим покрытием толщиной  $e = \lambda/4n^*$ , оптимизированной для некоторой длины волны  $\lambda$ , находятся по формуле [3]:

$$\rho_i = [(n - n^{*2}) / (n + n^{*2})]^2$$

где  $n, n^*$  – показатель преломления материала иллюминатора и его покрытия соответственно.

В отсутствие покрытия следует принять  $n^* = 1$ . Для типового материала иллюминатора ZnSe имеем:  $n = 2,4, \sigma_{и} = 0,01 \text{ см}^{-1}$ .

Совместная энергетическая светимость фона и атмосферы  $M_{фа}$  в (12) составляет:

$$M_{фа} = M\varepsilon + M_{окр}(1 - \varepsilon) - \Delta M + E_{\Sigma} K \tau_a (1 - \varepsilon),$$

$$M = \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) d\lambda; \quad M_{окр} = \int_{\Delta\lambda} M_{окр}(\lambda) d\lambda,$$

где  $E_{\Sigma}$  – интегральная облученность фона местности от Солнца,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ , определяемая, например, по методике [3];  $\varepsilon$  – коэффициент излучения фона в диапазоне  $\Delta\lambda$ ;  $K$  – доля солнечного излучения в диапазоне  $\Delta\lambda$  (для диапазона спектра 3-5 мкм  $K = 0,015$ , для диапазона 8-12 мкм  $K = 0,0009$ );  $M, M_{окр}$  – энергетическая светимость черного тела с температурой фона  $T$  и окружающей ТВП среды соответственно в диапазоне  $\Delta\lambda$ ,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ;  $M_{окр}(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости черного тела с температурой окружающей среды,  $\text{Вт}/(\text{см}^2\text{мкм})$ ;  $\Delta M$  – разность энергетических светимостей фона в диапазоне  $\Delta\lambda$ , воспринимаемых с высоты 0 и  $H$ ,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ .

При визировании из верхней полусферы наземного объекта под углом места  $\psi \leq 0$  наблюдатель по сути видит проекцию объ-

екта на плоскость, перпендикулярную линии визирования. Для оценки  $M_{фа}$  введем новую систему декартовых координат  $X, Y, Z$ , ось  $Z$  которой находится в этой плоскости и, следовательно, истинный зенит будет в данной системе координат отклонен от оси  $Z$  на угол  $\psi$ . Тогда величина  $M_{окр}(\lambda)$  в (13) может быть рассчитана по формуле, вывод которой аналогичен приведенному в [3]:

$$M_{окр}(\lambda) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta \int_0^{\pi} L(\lambda, \chi, 0) \sin^2 \mu d\mu$$

где  $\theta, \mu$  – азимутальный и зенитный угол линии визирования той или иной точки окружающей среды соответственно в системе координат  $X, Y, Z$ ;  $L(\lambda, \chi, H)$  – спектральная плотность энергетической яркости окружающей среды,  $\text{Вт}/(\text{см}^2\text{ср}\cdot\text{мкм})$ , в точке, определяемой зенитным углом  $\chi$  в старой системе координат, для ТВП на высоте  $H$ .

Угол  $\chi$  связан с углами  $\psi, \theta$  и  $\mu$  формулой [11]:

$$\chi = \arccos(\cos\psi \cos\mu - \sin\psi \sin\mu \cos\theta)$$

При этом значение  $\chi < \pi/2$  отвечает излучению небосвода, а  $\chi > \pi/2$  излучению земли и слоя атмосферы от земли до объекта.

В качестве значений  $L(\lambda, \chi, H)$  нами использовали соответствующие данные, формируемые на основе оптической модели атмосферы, реализованной в программе [12], для случая безоблачного неба, высокой перистой, средней кучевой и низкой слоистой сплошной облачности в летнее и зимнее время года в средних широтах.

Введем параметр  $\eta, K$ , определяемый как

$$\eta = \frac{M - M_{окр}}{dM/dT}; \quad \frac{dM}{dT} = \frac{1,44 \cdot 10^4}{T^2} \int_{\Delta\lambda} M(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda} \approx \frac{1,44 \cdot 10^4 M}{\lambda_0 T^2}$$

Полученные с учетом (13)-(15) расчетные значения  $\eta$  для различных углов места объекта  $\psi$ , а также форм облачности представлены в таблице.

Для величины  $\Delta M$  в (13) можно записать приближенное выражение:

$$\Delta M = (dM/dT)\Delta T_{R\phi}; \quad \Delta T_{R\phi} = T_{R0} - T_{RH}$$

где  $T_{R0}, T_{RH}$  – радиационная температура фона,  $K$ , воспринимаемая с высоты 0 и  $H$  соответственно.

Таблица 1.

Значения параметра  $\eta$  в диапазонах спектра 3-5 и 8-12 мкм в зависимости от наличия и форм облачности и угла места объекта  $\psi$

$\psi$ , град	$\eta$ , К											
	Ясно и высокая перистая облачность				Средняя кучевая облачность				Низкая слоистая облачность			
	3-5 мкм		8-12 мкм		3-5 мкм		8-12 мкм		3-5 мкм		8-12 мкм	
	лето	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима
0	3,05	3,53	9,83	15,3	1,07	1,00	1,98	2,17	0,29	0,26	0,62	0,58
-10	3,84	4,40	12,5	18,7	1,34	1,24	2,46	2,61	0,36	0,32	0,76	0,69
-20	4,67	5,30	15,3	22,0	1,61	1,48	2,95	3,06	0,44	0,38	0,90	0,81
-30	5,50	6,19	18,2	25,3	1,88	1,71	3,44	3,49	0,51	0,45	1,04	0,93
-40	6,30	7,06	21,0	28,4	2,14	1,94	3,91	3,90	0,58	0,51	1,17	1,04
-50	7,06	7,86	23,6	31,3	2,39	2,15	4,34	4,26	0,65	0,56	1,29	1,13
-60	7,71	8,56	25,9	33,7	2,60	2,33	4,72	4,57	0,71	0,61	1,39	1,21
-70	8,24	9,12	27,8	35,6	2,77	2,47	5,02	4,82	0,76	0,65	1,47	1,28
-80	8,60	9,51	29,0	37,0	2,88	2,57	5,23	4,98	0,79	0,68	1,53	1,32
-90	8,73	9,65	29,5	37,5	2,93	2,61	5,31	5,04	0,80	0,69	1,55	1,33

Значения  $T_{R0}$ ,  $T_{RH}$  находятся из решения следующих уравнений для угла места объекта  $\psi$  и высоты 0 и H соответственно:

$$\int_{\Delta\lambda} M_{R0}(\lambda)d\lambda = \pi \int_{\Delta\lambda} L(\lambda, \pi/2 - \psi, 0)d\lambda$$

$$\int_{\Delta\lambda} M_{RH}(\lambda)d\lambda = \pi \int_{\Delta\lambda} L(\lambda, \pi/2 - \psi, H)d\lambda$$

где  $M_{R0}(\lambda)$ ,  $M_{RH}(\lambda)$  – спектральная плотность

энергетической светимости черного тела с температурой  $T_{R0}$  и  $T_{RH}$  соответственно, Вт/(см<sup>2</sup>·мкм).

Найденные с учетом (16) зависимости разности  $\Delta T_{R\phi}$  от диапазона спектра и времени года хорошо аппроксимируются формулами (для  $\psi \leq -50$ ):

$$\Delta T_{R\phi} = \begin{cases} a[1 - \exp(-0,01H)]/\sin^{1/3}|\psi| & (\Delta\lambda = 3 - 5 \text{ мкм}); \\ 0 & (\Delta\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}, H \leq 1 \text{ км}); \\ b[1 - \exp(-0,1(H - 1))]/\sin^{2/3}|\psi| & (\Delta\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}, H \geq 1 \text{ км}), \end{cases}$$

где  $a = 125$  К,  $b = 4,5$  К (лето) или  $a = 84$  К,  $b = 2,3$  К (зима).

Тогда, используя для параметров  $\eta$  и  $dM/dT$  их выражения из (15), формулу (13) можно переписать так:

$$M_{\text{фа}} = M[1 - 1,44 \cdot 10^4 (\eta - \eta\varepsilon + \Delta T_{R\phi})/\lambda_0 T^2] + E_{\Sigma} K \tau_a (1 - \varepsilon)$$

Как показывает анализ, значение  $M$  для тепловых диапазонов спектра здесь может быть найдено по приближенной формуле (для  $T = 240-310$  К):

$$M = \begin{cases} 0,19 \cdot 10^{-4} \exp[0,13(T - 230)^{0,77}] & (\Delta\lambda = 3 - 5 \text{ мкм}); \\ 25 \cdot 10^{-4} \exp[0,068(T - 230)^{0,74}] & (\Delta\lambda = 8 - 12 \text{ мкм}). \end{cases}$$

Отметим, что определяемое по (15) значение  $\eta$  связывает разность радиационных тем-

ператур объекта и фона  $\Delta T_R$  со значениями их температур соотношением [3]:

$$\Delta T_R = \varepsilon_{\text{об}}(T_{\text{об}} - T) + \eta(\varepsilon_{\text{об}} - \varepsilon) + K[(1 - \varepsilon_{\text{об}})E_{\Sigma\text{об}} - (1 - \varepsilon)E_{\Sigma}]/(dM/dT)$$

где  $T_{\text{об}}$ ,  $\varepsilon_{\text{об}}$  – температура, К, и коэффициент излучения объекта в спектральном рабочем диапазоне  $\Delta\lambda$  соответственно;  $E_{\Sigma\text{об}}$  – интегральная облученность объекта от Солнца, Вт/см<sup>2</sup>.

Это соотношение открывает возможность выполнения, при наличии сведений о коэффициентах излучения объекта и фона, дистанционных оценок параметров температурных полей объектов местности при их контроле. Многие технические аспекты этой

проблемы обсуждаются в работах [13,14].

Заметим также, что, согласно (6), (7), погрешность оценки фотонного шума, вызванного дискретным характером излучения окружающей среды, сравнительно мало влияет на точность расчета разности температур, эквивалентной временному шуму  $\Delta T$  в, поскольку СКО этого шума пропорционально лишь корню квадратному из потока излучения, падающего на ФПУ, а второй компонент шума ТВП – аппаратный шум – от этого потока вообще не зависит. Данное обстоятельство и оправдывает упрощенный характер оценки эффективной энергетической светимости  $M_\Sigma$  в (7). Более того, для ориентировочных оценок  $\Delta T_\Phi$  по (7) можно принять, что излучение окружающей среды обусловлено только основной составляющей – излучением фона:  $M_\Sigma = M$ .

Практически интересно проследить зависимость  $\Delta T$  в  $f(T)$  разности температур, эквивалентной временному шуму, от температуры фона в некоторых частных случаях, для которых эта зависимость оказывается достаточно обозримой.

1. ТВП работает в режиме ограничения фоном ( $\Delta T_a \ll \Delta T_\Phi$ ) при ограниченной зарядовой емкости устройства считывания ( $t_n < \alpha_m/F$ ). Тогда, согласно (7)-(10), значение  $\Delta T_B$ , равное

$$\Delta T_B = \frac{M_\Sigma}{Y\sqrt{\alpha N_m}} \approx \frac{\lambda_0 T^2}{1,44 \cdot 10^4 \tau_0 \sqrt{\alpha N_m}},$$

с повышением температуры фона  $T$  возрастает.

$$\Delta T_B = \frac{\Delta T_{\text{ФПУ}} Y_0 B \sqrt{F t_{n0} / \alpha_m}}{Y B_0} \approx \frac{\Delta T_{\text{ФПУ}} T^2 M_0 B \sqrt{F / \alpha_m F_0}}{T_0^2 M B_0}$$

Поэтому с возрастанием температуры фона значение  $\Delta T_B$  здесь также снижается.

В промежуточных ситуациях зависимости  $\Delta T_B = f(T)$  могут быть немонотонными. В качестве иллюстрации на рисунке изображены рассчитанные по (6)-(8) зависимости  $\Delta T_B = f(t)$  разности температур, эквивалентной временному шуму  $\Delta T_B$  от температуры фона  $t = T - 273$  для ТВП воздушного базирования,

Вторая из этих формул, определяющая предельное значение пороговой чувствительности несканирующих ТВП, по существу аналогична соответствующему выражению, полученному в работе [15], где приводится его детальный анализ. Результирующая разность температур, эквивалентная шуму  $\Delta T$ , с учетом (6), (11), в этом типовом случае составляет:

$$\Delta T = \frac{\lambda_0 T^2 \sqrt{1/\alpha N_m + \sigma_{\text{отн}}^2}}{1,44 \cdot 10^4 \tau_0}.$$

2. ТВП работает в режиме ограничения шумом ( $\Delta T_a \gg \Delta T_\Phi$ ) при ограниченной зарядовой емкости устройства считывания ( $t_n < \alpha_m/F$ ). При этом находим:

$$\Delta T_B = \frac{\Delta T_{\text{ФПУ}} Y_0 \sqrt{\alpha_0 B M_\Sigma}}{Y \sqrt{\alpha B_0 M_0}} \approx \frac{\Delta T_{\text{ФПУ}} T^2 \sqrt{\alpha_0 B M_0}}{T_0^2 \sqrt{\alpha B_0 M}}$$

Отсюда вытекает, что с повышением температуры фона разность температур, эквивалентная временному шуму  $\Delta T_B$ , напротив, уменьшается.

3. ТВП работает в режиме ограничения фоном ( $\Delta T_a \ll \Delta T_\Phi$ ) при неограниченной зарядовой емкости устройства считывания ( $t_n = \alpha_m/F$ ). Тогда имеем:

$$\Delta T_B = \frac{\sqrt{hc B M_\Sigma F}}{Y \sqrt{\lambda_m \eta_m S_\Pi}} \approx \frac{\lambda_0 T^2 \sqrt{hc B F}}{1,44 \cdot 10^4 \sqrt{\alpha_m \lambda_m \eta_m S_\Pi M}}$$

и приходим к тому же выводу.

4. ТВП работает в режиме ограничения шумом ( $\Delta T_a \gg \Delta T_\Phi$ ) при неограниченной зарядовой емкости устройства считывания ( $t_n = \alpha_m/F$ ), что дает:

использующих объектив с коэффициентом пропускания  $\tau_0 = 0,8$ , работающих в диапазонах спектра 3-5 мкм (ФПУ на InSb при относительном отверстии объектива  $\omega = 1:4$ ) или 8-12 мкм (ФПУ на соединении CdHgTe при  $\omega = 1:2$ ) в режиме ограничения фоном или промежуточном режиме, для которого  $\Delta T_{\text{ФПУ}} = 0,02$  К, с частотой кадров  $F = 25$  Гц без микросканирования при допустимом

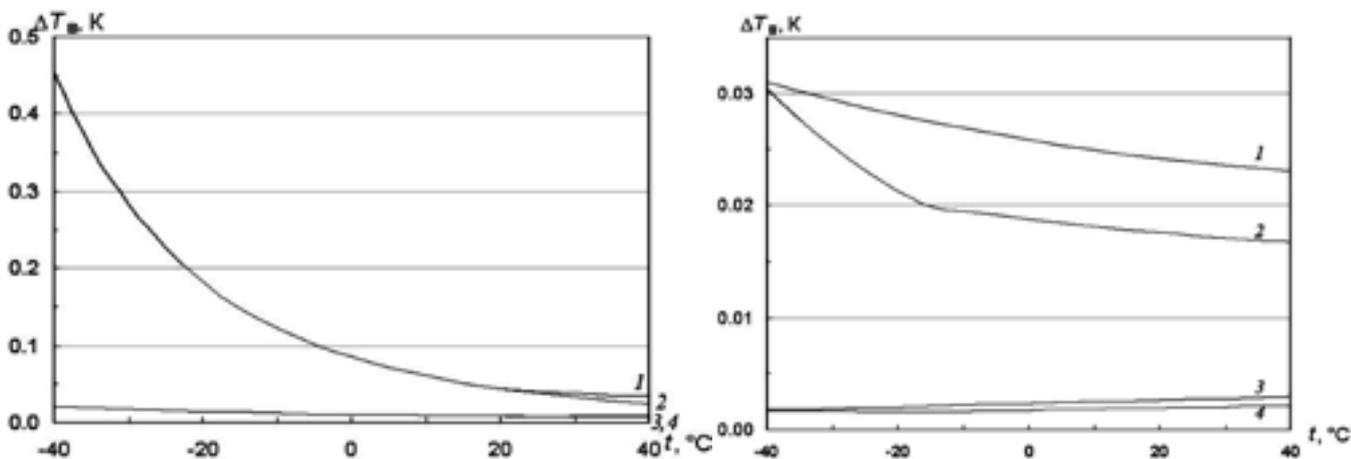


Рисунок 1.

Зависимости разности температур, эквивалентной временному шуму  $\Delta T_{в}$ , К, от температуры фона  $t$ , °С, для ряда значений допустимого уровня заполнения зарядовой емкости устройства считывания  $\alpha$  при различных режимах работы ТВП: а – диапазон спектра 3-5 мкм, б – диапазон спектра 8-12 мкм (1 –  $\alpha = 0,5$ , промежуточный режим; 2 –  $\alpha = 0,95$ , промежуточный режим; 3 –  $\alpha = 0,5$ , режим ограничения фоном; 4 –  $\alpha = 0,95$ , режим ограничения фоном)

уровне заряда емкости устройства считывания  $\alpha = 0,5$  или  $0,95$ . Как видно, для режимов ограничения фоном в диапазоне спектра 3-5 мкм при  $\alpha = 0,5$  и в диапазоне 8-12 мкм при  $\alpha = 0,95$  данные зависимости имеют слабовыраженный минимум, обусловленный тем, что с повышением температуры фона время накопления зарядов, первоначально не ограничиваемое зарядовой емкостью считывающего устройства, при некотором значении этой температуры начинает ею ограничиваться, и равенство  $t_{н} = \alpha_{м}/F$  изменяется на соотношение  $t_{н} < \alpha_{м}/F$ .

Рассмотрим далее оценку СКО  $\sigma_L$  результатов измерения по экрану монитора линейного размера  $L$  протяженного объекта. Как свидетельствуют исследования [16], СКО  $\sigma_L$ , м, определяется, главным образом, дискретностью изображения, обусловленной структурой матричного ФПУ, а также выходным отношением сигнал/шум  $m$  и приближенно равно (без учета систематической составляющей погрешности измерений, которая, в принципе, всегда может быть учтена и, значит, исключена):

$$\sigma_L = D(\delta_0/\sqrt{\xi})\sqrt{0,16 + 4/m^2}; \quad m = |\Delta T_R| \tau_a / \Delta T = |\Delta T'_R| / \Delta T$$

где  $\xi$  – коэффициент заполнения ФПУ (fill-factor).

Поскольку относительное отверстие объектива ТВП  $\omega$  в (8) составляет

$$\omega = 10^{-3} D_0 \delta_0 / \sqrt{S_{п}}$$

где  $D_0$  – диаметр объектива, см, это означает, что между СКО  $\sigma_{\Delta T}$  и  $\sigma_L$  имеет место определенное обменное соотношение, которое для заданных массогабаритных ограничений на ТВП, определяющих предельный диаметр объектива, и выбранного ФПУ регулируется подбором фокусного расстояния объектива, от которого зависит элементарное поле зрения ТВП  $\delta_0$ . Следовательно, выбирая то или иное значение фокусного расстояния, можно повысить точность оценки разности радиационных температур  $\Delta T_{TR}$  объекта и фона, но только за счет снижения точности оценки размеров  $L$  объекта, и наоборот, однако совместная точность оценки параметров  $\Delta T_{TR}$  и  $L$  объекта, определяемая произведением СКО  $\sigma_{\Delta T} \sigma_L$ , при этом зависит от величины  $\delta_0$  в гораздо меньшей степени. В частности, при работе ТВП на малых дальностях в режиме ограничения фоном при невысоком относительном отверстии объектива и достаточно больших значениях отношения сигнал/шум и зарядовой емкости устройства считывания произведение  $\sigma_{\Delta T} \sigma_L$ , составляющее, согласно изложенному,

$$\sigma_{\Delta T} \sigma_L = \frac{0,8 \cdot 10^3 D \sqrt{hc M_{\Sigma} F}}{Y D_o \tau_a \sqrt{\alpha_m \lambda_m \eta_m \xi}}$$

по сути, оказывается инвариантом, не зависящим от элементарного поля зрения ТВП. Следовательно, это соотношение можно считать формальным аналогом известного квантового принципа неопределенности Гейзенберга, согласно которому скорости и координаты микрочастиц не могут быть одновременно измерены с произвольно высокой точностью.

Можно полагать, что представленные результаты будут полезны при разработке и применении измерительных ТВП при оценке энергетических и геометрических параметров объектов местности.

*Список литературы:*

1. Филиппов В.Л., Танташев М.В. Оптико-геофизическая модель атмосферы «Тропосфера-2000» // Прикладная физика. – 2004. – № 2. – С. 114-117.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201466067 «Модель для расчета прозрачности атмосферы на произвольно ориентированных оптических трассах» / Филиппов В.Л., Иванов В.П., Танташев М.В., Овсянников Я.В. Дата гос. регистрации 13.10.2014.
3. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. – Казань: Отечество, 2006. – 595 с.
4. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Оптические линии связи малогабаритных управляемых ракет в условиях действия помех двигательных установок. – М.: НТЦ «Информтехника», 2000. – 180 с.
5. Chrzanowski K., Fischer J., Matyszkiew R. Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement // Optical Engineering. – 2000. – № 9. – P. 2535-2544.

6. Holst G. Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003. – 442 p.
7. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Оптическая погода в нижней тропосфере. – Казань: Дом печати, 1998. – 183 с.
8. Smith S., Mooney J., Tantalio T., Fiete R. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems // Optical Engineering. – 1999. – № 5. – P. 821-826.
9. Лу И.И. Анализ зависимости температурного разрешения тепловизионных систем от зарядовой емкости устройства считывания // Автометрия. – 2001. – № 2. – С. 131-137.
10. Naveh O. Sensitivity of scanning and staring infrared seekers for air-to-air missiles // Proc. SPIE. – 1997. – V. 3061. – P. 692-711.
11. Соколов Б.З. Расчет спектральной яркости дневной атмосферы Земли // Измерительная техника. – 2001. – № 9. – С. 40-43.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660669 «Программа для расчета собственного излучения атмосферы в оптическом диапазоне электромагнитных длин волн» / В.Л. Филиппов, М.В. Танташев, Я.В. Овсянников, И.Г. Вендеревская. Дата гос. регистрации 13.10.2014.
13. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Исследование точности измерений температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике ИК прибора // Измерительная техника. – 2015. – № 3. – С. 48-52.
14. Chrzanowski K., Matyszkiew R., Fischer J., Barela J. Uncertainty of temperature measurement with thermal cameras // Optical Engineering. – 2001. – № 6. – P. 1106-1114.
15. Маркин В.А. Пределы температурной чувствительности тепловизоров третьего поколения // Оптический журнал. – 2010. – № 2. – С. 51-58.
16. Павлов Н.И. Измерение размеров объекта на экране монитора оптико-электронной системы наблюдения // Оптический журнал. – 1996. – № 1. – С. 85-88.

# ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКСПЕРТНОГО КОНТРОЛЯ РАЗРЕШЕНИЯ НА МЕСТНОСТИ ВОЗДУШНОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ АППАРАТУРЫ

ОВСЯННИКОВ В.А., ФИЛИПШОВ В.Л.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru, anastacia.zhdanova@gmail.com

*Для снижения влияния субъективных факторов и повышения достоверности экспертного контроля разрешения на местности воздушной тепловизионной аппаратуры предложено статистическую оценку вероятности разрешения миры по ее изображению заменить оценкой вероятности различения двух мир – эквивалентной и альтернативной – и производить ее, в условиях, возможно отличных от нормированных, для мир с тепловым контрастом меньшим и/или с дистанции до них большей заданных значений. Представлена методика расчета соответствующей достоверной вероятности, отвечающей заданной нижней границе доверительного интервала для вероятности разрешения эквивалентной миры.*

**Ключевые слова:** достоверность контроля, вероятность разрешения миры, тепловизионное изображение.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основным показателем эффективности воздушной тепловизионной аппаратуры (ВТА) является вероятность вскрытия (обнаружения или распознавания) объектов на заданной дальности. Однако прямой контроль вероятности вскрытия объекта посредством ВТА затруднен тем, что этот показатель зависит от множества факторов, не связанных с самой ВТА: вида и алфавита объектов, квалификации и психофизического состояния операторов, типа фона, в частности степени его тепловой неоднородности, ракурса наблюдения объекта и его локализации в поле зрения, распределения температуры по площади объекта, наличия и вида маскировки, условий наблюдения изображения (яркость, контраст, видимое увеличение) и др., которые к тому же весьма трудно поддаются количественному определению. Поэтому любая ВТА, так же как и другая оптическая

и оптико-электронная аппаратура аэрокосмического базирования [1], как правило, аттестуется по отношению к специальным тест-объектам – периодическим мирам, причем в качестве основного приемо-сдаточного параметра ВТА используется разрешение на местности  $A$  – полупериод эквивалентной тепловой миры,  $m$ , имеющей тепловой контраст и размеры, соответствующие объекту, и разрешаемой с вероятностью 0,5.

Величина  $A$ , по сути являющаяся дополнительным показателем эффективности ВТА, определяется эквивалентной температурно-частотной характеристикой (ТЧХ) аппаратуры  $\Delta T_{\text{раз}} = f(\nu)$ , под которой понимается зависимость минимальной разрешаемой разности температур  $\Delta T_{\text{раз}}$ , К, от угловой частоты  $\nu$ , мрад<sup>-1</sup>, эквивалентной тепловой миры. В свою очередь, разрешение на местности прямо определяет посредством соответствующей операциональной модели (например,

NVTherm) вероятность вскрытия  $P_{\Sigma}$  данной ВТА объектов местности или же уровень дешифрируемости аэрокосмических изображений по шкале NIIRS, и для обеспечения эффективной работы ВТА именно для величины  $A$  и задаются соответствующие технические требования [2,3]. Целесообразность использования понятия «разрешение на местности» обусловлена еще и тем, что, согласно широко известному практическому способу оценки разрешающей способности  $N$ , лин/мрад, аэрокосмических оптико-электронных систем, которая составляет (например, [4])  $N = D/2b$ , где  $D$  – длина трассы (дистанция до объекта), км;  $b$  – размер минимального обнаруживаемого объекта, м, значение  $A$  приблизительно совпадает с этим размером  $b$ . Такие же достаточно жесткие монотонные зависимости  $P_{\Sigma} = f(A)$  имеют место и для видовой аппаратуры, работающей в видимой и ближней инфракрасной области спектра, для которой используется понятие, аналогичное ТЧХ – контрастно-частотная характеристика – зависимость минимального разрешаемого контраста от угловой частоты миры. Это, допуская сопоставление по величине  $A$  различной, в том числе разнотипной, аппаратуры при наблюдении объектов, поднимает существующие критерии ее разрешающей способности, восходящие еще к Релею, на качественно новый уровень [5,6]. Поэтому представляется, что повсеместно распространенные в мире предельно простые и удобные для практики критерии разрешения, определяемые по периодической миры, несмотря на приписываемые им (на наш взгляд, не вполне обоснованно) недостатки [7], еще долго будут играть роль одной из вполне адекватных мер эффективности и унифицированного критерия сравнения любой видовой аппаратуры.

Применительно к ВТА это означает, что если эквивалентная миры с разностью радиационных температур ее полос и фона  $\Delta T_M$ , К, равной разности (для определенности – положительной) радиационных температур объекта и фона  $\Delta T_R$ , К, длиной полос, равной критическому размеру объекта (корню ква-

дратному из его видимой площади)  $h$ , м, и заданной шириной полос  $A$ , удаленная на заданное расстояние  $D$ , разрешается по изображению с вероятностью  $P_{\text{раз}} \geq 0,5$ , то требование технического задания по разрешению на местности вполне удовлетворяется.

Отметим, что аттестация видовой аппаратуры возможна и с использованием других тест-объектов, но лишь в случаях, когда имеются соответствующие операциональные модели, позволяющие адекватно соотнести результаты этой аттестации с эффективностью данной аппаратуры при ее работе по реальным объектам. В частности, в последние годы для аттестации тепловизионных приборов разработана операциональная модель TOD, подразумевающая использование тест-объектов в виде равносторонних треугольников, представляемых в одной из четырех возможных ориентаций, которую операторам и предлагается определить по их изображениям [8]. Если же эти модели отсутствуют (например, применительно к фрактальным мирам, обладающим свойством самоподобия [9]), либо не вполне достоверны, либо основаны на использовании недостаточно определенных и обоснованных критериев разрешения, то практический смысл такой аттестации невелик.

В связи с изложенным, нашей задачей является обоснование и разработка процедуры статистического контроля разрешения на местности ВТА, обеспечивающего, при ограниченном составе экспертной группы, достаточно высокую достоверность этого контроля.

## ОБОСНОВАНИЕ И ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ

Из определения эквивалентной ТЧХ ВТА  $\Delta T_{\text{раз}} = f(v)$  вытекает, что для разрешения на местности  $A$  имеет место соотношение:  $A = D/2f^{-1}(\Delta T_M)$ . Однако контроль разрешения на местности в процессе аттестации ВТА, очевидно, связан с ошибкой, определяемой погрешностью изготовления миры (допустимая относительная погрешность для ширины полосы должна быть не более 10% – этот фактор существен при контроле в стендовых условиях при использовании коллима-

тора, когда требуемые миры очень мелкие), погрешностью определения и стабилизации по площади миры и по времени наблюдения разности радиационных температур миры и фона и, особенно, высокой степенью субъективности решений операторов относительно факта разрешения или неразрешения миры. Причины отмеченной субъективности заключаются в том, что при этом имеют место:

- различная контрастная чувствительность зрительного анализатора разных операторов, которая, в отличие от остроты зрения, коррекции не поддается;

- вариации используемого операторами критерия разрешения миры.

Разброс контрастной чувствительности зрительного анализатора операторов приводит к тому, что поскольку оценки  $\Delta T_{\text{раз}j}$  разрешаемой разности температур, полученные  $n_0$  разными операторами, подчинены логарифмически нормальному закону распределения со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma_0 = \lg 1,58 = 0,2$ , то разрешаемая разность температур является величиной случайной, которая с доверительной вероятностью  $R$  находится в пределах [10]:

$$\left( \exp(-2,3\sigma_0\Phi^{-1}(R))\Delta T_{\text{раз}}/\sqrt{n_0} - \exp(2,3\sigma_0\Phi^{-1}(R))\Delta T_{\text{раз}}/\sqrt{n_0} \right)$$

$$\Delta T_{\text{раз}} = \left( \prod_{j=1}^n \Delta T_{\text{раз}j} \right)^{1/n_0};$$

$$\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y \exp(-t^2/2) dt \approx \sqrt{1 - \exp(-0,63y^2)}$$

где  $\Delta T_{\text{раз}}$  – среднее геометрическое оценок  $\Delta T_{\text{раз}j}$ ;  $\Phi(y)$  – интеграл вероятности и его аппроксимация (для  $y \geq 0$ );  $\Phi^{-1}(y)$  – функция, обратная  $\Phi(y)$ .

В частности, для  $R = 0,95$  эти пределы составляют:

$$\left( 0,4\Delta T_{\text{раз}}/\sqrt{n_0} - 2,5\Delta T_{\text{раз}}/\sqrt{n_0} \right)$$

Поэтому соответствующие вариации оценок  $A$ , разумеется, будут также велики.

В попытках придать контролю разрешения на местности точность и объективность разработчики обычно формируют небольшую группу высококвалифицированных операторов, которым и поручаются соответствую-

щие измерения. При этом считается, что эти операторы должны удовлетворять следующим условиям:

- иметь достаточно высокую контрастную чувствительность органа зрения;

- оценки разрешения на местности одной и той же ВТА, полученные разными операторами или сделанные в разное время одним и тем же оператором, должны быть близки друг к другу;

Именно высокая степень воспроизводимости измерений и является здесь признаком высокой квалификации оператора, и никакого иного смысла в это понятие вкладываться не должно. Иначе говоря, оператор с высокой квалификацией может и не разрешить ту миру, которую, возможно, разрешает оператор с более низкой квалификацией, но зато его показания являются более стабильными и воспроизводимыми. Поэтому для высококвалифицированных операторов значение СКО  $\sigma_0$ , определяющее степень разброса оценок  $\Delta T_{\text{раз}j}$ , может быть в  $\sim 1,5$  раза меньше:  $\sigma_0 = 0,13$ .

Рассмотрим подробнее вопрос о выборе критерия разрешения миры при контроле значений  $A$ . Прежде всего, следует отметить, что отечественная практика единого критерия разрешения изображения миры в аналогичных ситуациях не устанавливает. Например, при визуальном определении разрешающей способности фотоматериалов (ГОСТ 2819-84) и объективов (ГОСТ 25502-82) мира считается разрешенной, если наблюдатель может лишь сосчитать по изображению число штрихов миры, причем он должен быть уверен, что его суждение о числе штрихов основано не на априорном знании их числа. При испытании электронно-оптических преобразователей (ГОСТ 21815-86), напротив, требуется раздельное видение штрихов миры по всей их длине. В методике же аттестации телевизионных кинескопов (ГОСТ 19139-73) под критерием разрешения миры понимается некая «различимость» изображения ее штрихов, не имеющая ясного, однозначного толкования. Следовательно, при аттестации ВТА возможны две крайние ситуации:

- мира считается разрешенной, если в ее изображении видна некоторая структура, даже если не все полосы разделены;

- мира считается разрешенной, если видна раздельно каждая из ее полос.

Естественно, может использоваться и множество промежуточных критериев разрешения.

Необходимо подчеркнуть, что применение первого из двух сформулированных выше критериев при аттестации цифровых ВТА (с выборкой) принципиально недопустимо. Дело в том, что вследствие интерференции периодической структуры мира с периодической же структурой фотоприемника возникают так называемые «биения» (периодические вариации огибающей) контраста изображения мира с угловой частотой  $\nu_6 = 2(\nu_n - \nu)$ , где  $\nu_n$  – частота Найквиста, равная половине частоты выборки [11].

Поэтому при достаточно большом числе полос периодического тест-объекта оператор может видеть изображение некоей виртуальной мира с угловым периодом  $1/\nu_6$ , большим периода той реальной мира, которая находится на местности или в фокальной плоскости коллиматора, даже в том случае, когда эта мира реально не разрешается, т.е. возникает явление ложного разрешения. Если же число полос мира невелико, то оператор видит на изображении просто некоторую структуру; следовательно, ее наличие никак не может являться признаком действительного разрешения мира.

Наиболее обоснованным критерием разрешения мира при аттестации видовой аппаратуры считается возможность определения по изображению числа полос тест-объекта и их ориентации. Этой ситуации отвечают и все известные математические модели для расчета ТЧХ аппаратуры. Однако воспользоваться на практике данным критерием в полной мере не удастся, ибо в действительности операторы, как правило, априори знают и количество полос мира, и их расположение.

Для исключения или существенного ослабления влияния отмеченных субъективных факторов при контроле разрешения на местности в работе [12] предложен метод, суть

которого заключается в том, что наряду с 4-х полосной мирой с соотношением сторон 7:1 и шириной полос  $A$  наблюдателям в случайной последовательности с одинаковой средней частотой предъявляется вторая мира тех же габаритных размеров и того же теплового контраста, но содержащая не 4, а 5 полос с соотношением сторон 9:1, т.е. с шириной полос, равной  $(7/9)A = 0,78A$ . Наблюдателям в серии опытов предлагается определить по изображению число полос каждой предъявленной им мира. Таким образом, задача разрешения мира с шириной полос  $A$  при этом сводится к задаче двухальтернативного различения данных мир.

Вполне очевидно, что при реализации описанной процедуры решения операторов основываются не только на анализе изображения мир, но и, возможно неосознанно, на простом угадывании. Поэтому фактически достигаемая на практике вероятность различения мир  $P$ , под которым понимаются правильные ответы операторов, определяется вероятностью суммы совместных событий:

$$P = P_{\text{раз}} + P_y - P_{\text{раз}} P_y \quad (1)$$

где  $P_{\text{раз}}$  – вероятность различения мир только по их изображениям;  $P_y = 0,5$  – вероятность угадывания.

Следовательно, для порогового значения  $P_{\text{раз}} = 0,5$  фактическим критерием разрешения мира с шириной полосы  $A$  будет, согласно (1), выполнение соотношения  $P \geq P_1$  при  $P_1 = 0,75$ . Данная процедура контроля имеет следующие достоинства [12]:

- облегчается поставленная задача наблюдения, а решения операторов не зависят от критерия разрешения мира;
- допустимо использовать меньшее число операторов и не требуется высокой степени их тренированности;
- исключается возможность ложного разрешения мира с частотой, превышающей частоту Найквиста;
- процедура с равным успехом пригодна для аттестации как аппаратуры с выборкой, так и без нее.

Отметим, что предложения некоторых ав-

торов по использованию в качестве альтернативного тест-объекта не периодической миры, а равноконтрастного и равновеликого объекта отнюдь не решают задачи, ибо выявить наличие некоторой структуры в изображении миры (эта структура может проявиться и в виде уже упомянутых выше биекций контраста), вообще говоря, можно, даже если ее угловой период значительно меньше предела углового разрешения ВТА, и, следовательно, различение оператором периодической миры и данного тест-объекта по их изображениям никак не может служить критерием разрешения миры.

При различении описанных выше мир необходимо иметь в виду, что искомая вероятность их различения  $P$  принципиально не известна, вместо нее определяется оценка  $P^* = n/n_\Sigma$ , где  $n$  и  $n_\Sigma$  – число успешных и общих попыток различения соответственно. Поскольку суждения любого оператора о различении мир по их изображениям, полученным в одинаковых условиях, в высокой степени коррелированы, для обеспечения независимости попыток их различения, при которой только и имеет смысл оценка  $P^*$ , следует в первую очередь увеличивать не число предъявляемых изображений, а состав операторов-дешифровщиков. Это является основным способом повышения достоверности контроля разрешения на местности ВТА, ибо дешифровочные возможности операторов даже одинаково высокой квалификации индивидуальны и случайны: они зависят от психофизического состояния оператора, его конкретного опыта, внимания, степени мотивации, усталости и эмоционального настроения на момент дешифрирования. Поэтому считаем далее, что количество независимых испытаний равно числу операторов:  $n_\Sigma = n_0$ .

Прямой путь повышения достоверности оценки вероятности  $P$  заключается просто в существенном расширении состава экспертной группы (до 10-15 человек), по отношению к которой и определяется оценка  $P^*$ . Однако такое увеличение числа операторов труднореализуемо и резко удлиняет процедуру контроля. Поэтому, так как

число задействованных операторов на практике, как правило, невелико, возникает проблема оценки доверительной вероятности  $R(P \geq P_1)$  того, что вероятность различения мир действительно не ниже порогового значения, равного здесь  $P_1 = 0,75$ . Данная доверительная вероятность и является мерой достоверности полученных результатов контроля.

Количество операторов, которым следует предъявлять для различения одни и те же изображения мир, зависит от вероятности различения (априори неизвестной), доверительного интервала для этой вероятности и самой доверительной вероятности.

Согласно [13], доверительная вероятность  $R(P \geq P_1)$  того, что  $P \geq P_1$ , если в  $n$  независимых испытаниях получено  $n$  положительных результатов, равна вероятности того, что в  $n_0 + 1$  испытаниях при вероятности положительного исхода единичного испытания  $P = P_1$  будет получено не более  $n$  положительных результатов. Это позволяет воспользоваться для расчета  $R$  формулой для биномиального распределения:

$$R = \sum_{i=0}^n C_{n_0+1}^i P_1^i (1 - P_1)^{n_0+1-i} \quad (2)$$

В частности, когда все попытки различения оказались успешными ( $n = n_0$ ), формула (2) принимает более простой вид [13]:

$$R = 1 - P_1^{n_0+1} \quad (3)$$

При нижней границе доверительного интервала  $P_1$ , близкой к 0,5 (практически – при  $0,2 \leq P_1 \leq 0,8$ ), и  $n_0 \geq 5$  для оценки доверительной вероятности  $R(P \geq P_1)$  применима гауссовская аппроксимация [14]:

$$R = \frac{1}{2} [1 + \Phi(x)]; \quad x = \frac{n + 0,5 - P_1(1 + n_0)}{\sqrt{P_1(1 + n_0)(1 - P_1)}} \quad (4)$$

Очевидно, при неограниченном увеличении числа испытаний ( $n_0 \rightarrow \infty$ ) доверительная вероятность  $R(P \geq P_1)$  принимает значения:

$$R = \begin{cases} 1 & \text{при } P^* \geq P_1; \\ 0 & \text{при } P^* < P_1. \end{cases}$$

Следовательно, если при этом оценка вероятности различения мир превышает

требуемый уровень, то теоретически абсолютно достоверно можно утверждать, что сама вероятность различения также выше этого уровня.

Из сравнения (2) и (3) вытекает, что минимальное число испытаний  $n_{\min}$ , необходимое для обеспечения соответствующей доверительной вероятности  $R$ , достигается при реализации критерия различения  $P^* = n_0/n_0$ , и оно составляет:

$$n_{\min} = \text{int}(\ln(1 - R) / \ln P_1), \quad (5)$$

где  $\text{int}(x)$  – целая часть  $x$ .

Поскольку доля успешных попыток различения мир  $P^* = n/n_0$  до начала испытаний неизвестна, то определить априори требуемое число по этим попыткам принципиально невозможно: по формуле (5) можно рассчитать лишь минимально необходимое их количество (оценку снизу). Поэтому рекомендуется производить расчет значения  $R$  по (2) после каждого испытания или малой серии испытаний (попыток различения) до тех пор, пока значение доверительной вероятности  $R(P \geq P_1)$  не достигнет минимально приемлемого уровня  $R_{\min}$ .

При назначении норм (допустимых значений)  $R_{\min}$  на эту доверительную вероятность следует иметь в виду, что во всех задачах статистической проверки гипотез, к которым можно отнести и контроль разрешения на местности, норма доверительной вероятности принципиально не может быть определена из каких-либо правил математической статистики [14]. Она назначается исключительно из эвристических соображений – имеющегося опыта, здравого смысла и интуиции – и обычно находится в пределах  $R_{\min} = 0,8-0,95$ .

Рассчитанные по (2) значения доверительной вероятности  $R(P \geq P_1)$  при  $P_1 = 0,75$  для

различного числа безуспешных  $n_0 - n$  и общих по попыток различения мир приведены в таблице. Из нее следует, что если, например, четыре из пяти операторов правильно различили миры ( $n_0 - n = 1$ ,  $P^* = n/n_0 = 4/5 = 0,8$ ), то с доверительной вероятностью, равной лишь  $R = 0,47$ , можно утверждать, что фактическая вероятность их различения  $P \geq 0,75$ , т.е. в этом случае вывод о соответствии разрешения на местности данной ВТА требуемому значению будет недостаточно достоверен. Для обеспечения минимально приемлемого уровня  $R = 0,8$  необходимо, чтобы эти миры различались всеми пятью операторами ( $n_0 - n = 0$ ) или, например, девятью операторами из десяти; при этом, как видно из таблицы, в любом случае число задействованных операторов должно быть не меньше пяти.

Для повышения доверительной вероятности  $R$  при фиксированном числе операторов по или же снижения числа операторов по при фиксированной доверительной вероятности  $R$  целесообразно увеличить заданную дистанцию до мир  $D_1 = D$  и/или уменьшить первоначальный тепловой контраст мир  $\Delta T_{m1} = \Delta T_m$  до таких значений  $D_2$  и  $\Delta T_{m2}$  соответственно, чтобы оценка  $P^* = n/n_0$  вероятности различения мир еще не снизилась. Тогда доверительная вероятность  $R(P \geq P_2)$ , отвечающая соответствующей скорректированной нижней границе доверительного интервала  $P_2$ , будет выше. При этом фактические метеоусловия контроля, определяющие коэффициент пропускания атмосферы на трассе, соответствующий дистанции  $D_2$ , в общем случае могут отличаться от нормированных, для которых, как правило, и контролируется разрешение на местности ВТА.

Поскольку оценки высококвалифицированными операторами разрешаемой разности температур подчинены логарифми-

Таблица 1.

Значение доверительной вероятности  $R(P \geq 0,75)$  для различного числа безуспешных  $n_0 - n$  и общих  $n_0$  попыток различения мир

$n_0 - n$	$R(P \geq 0,75)$						
	$n_0 = 4$	$n_0 = 5$	$n_0 = 6$	$n_0 = 7$	$n_0 = 8$	$n_0 = 9$	$n_0 = 10$
0	0,76	0,82	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96
1	0,37	0,47	0,56	0,63	0,69	0,76	0,80

чески нормальному закону распределения с СКО, близким к  $\sigma_0 = 0,13$ , вероятность  $P_i$  различия каким-либо оператором мир, имеющих разность радиационных температур с фоном  $\Delta T_{mi}$  и находящихся на дистанции  $D_i$ , равна [10]:

$$P_i = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{\lg \Delta T_{mi} - \lg \Delta T_{рази}}{\sigma_0} \right) \right] \quad (6)$$

где  $\Delta T_{рази}$  – разрешаемая разность температур, соответствующая значениям  $\Delta T_{mi}$  и  $D_i$ , т.е. среднее геометрическое оценок этой разности, полученных разными операторами.

При контроле разрешения на местности ВТА может работать, в зависимости от конкретного сочетания теплового контраста тест-объекта, вариаций радиационной температуры фоновых неоднородностей, пороговой чувствительности ВТА, наличия и использования автоматической регулировки усиления видеосигналов и условий дешифрирования изображения, как в шумо-ограниченном, так и в контрастно-ограниченном режиме. Так, если миры, визируемые через слой атмосферы, располагаются на квазиоднородном фоне, то для их наблюдения широкий диапазон регистрируемой разности температур обычно не требуется, и в ВТА используется достаточно большое усиление видеосигналов, такое, чтобы на изображении был заметен шум. При этом достигается максимальная температурная чувствительность аппаратуры и реализуется шумоограниченный режим ее работы. Если же видимый шум отсутствует, то разрешение на местности ограничивается контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора и ВТА функционирует в контрастно-ограниченном режиме.

Для шумо-ограниченного режима работы значение  $\Delta T_{рази}$  составляет [2]:

$$\Delta T_{рази} = \Delta T \delta_0 E(x_i) / \varphi \tau_{ai} r \alpha \delta; \quad x_i = v_i \delta = D_i \delta / 2A$$

$$\alpha = a / \Delta a;$$

$$r = \sqrt{[1 + \exp(-1/FT_{гл})] / [1 - \exp(-1/FT_{гл})]}$$

$$T_{гл} = 0,019 + 0,051 / L^{0,17} \quad (7)$$

где  $x_i$  – относительная частота миры;

$\Delta T$  – разность температур, эквивалентная шуму, для данной температуры фона, К;  $\delta$  – эффективное значение элементарного поля зрения, учитывающее весь информационный тракт ВТА, мрад;  $\delta_0$  – элементарное поле зрения ВТА, мрад;  $\tau_{ai}$  – коэффициент пропускания атмосферы в спектральном рабочем диапазоне ВТА на дистанции до мира  $D_i$ , рассчитываемый, например, по методике [2];  $r$  – коэффициент, учитывающий временное накопление сигналов в смежных кадрах ВТА (для ВТА строчного типа без кадровой развертки значение  $r = 1$ );  $F$  – частота кадров, Гц;  $T_{гл}$  – постоянная времени глаза, с;  $a, \Delta a$  – размер и шаг элементов используемого фотоприемника соответственно, мкм;  $\varphi$  – число выборок на элемент;  $\alpha$  – коэффициент заполнения фотоприемника по одной координате;  $L'$  – яркость изображения фона, кд/м<sup>2</sup>;  $E(x_i)$  – эквивалентная относительная ТЧХ аппаратуры.

Зависимость  $E(x_i)$  можно аппроксимировать простой формулой (для  $x_i \geq 0,75$ ) [2]:

$$E(x_i) = 0,3\psi \exp(3,7x_i^2 + 4,35x_i); \quad \psi = \sqrt{7A/h}, \quad (8)$$

где  $\psi$  – коэффициент, учитывающий различие размеров стандартной миры с соотношением сторон полос 7:1, по отношению к которой обычно определяется ТЧХ, и эквивалентной миры с длиной полос  $h$ .

Эффективное значение элементарного поля зрения  $\delta$  в (7) определяется выражением [2]:

$$\delta = \delta_0 \sqrt{0,5 + 0,25\theta^2 + 0,52/\varphi^2 \alpha^2 + 0,26/\kappa^2 \alpha^2 Z^2}$$

$$\theta = \sqrt{(0,84\theta_d)^2 + \theta_a^2}; \quad \theta_d = d_d/a; \quad d_d = 2,44\lambda_0/\omega; \quad \theta_a = d_a/a,$$

где  $\theta_d, \theta_a, \theta$  – отношение диаметра дифракционного, абберрационного и суммарного кружка рассеяния объектива соответственно к размеру элемента фотоприемника;  $d_a$  – диаметр абберрационного кружка рассеяния объектива с концентрацией энергии 85%;  $\kappa$  – отношение числа элементов изображения монитора к числу элементов фотоприемника (по одной координате);  $\lambda_0$  – средняя длина волны спектрального рабочего диапазона;  $\omega$  – относительное отверстие объектива;  $Z$  – электронное увеличение изображения.

Из формул (7), (8) следует, что соотноше-

ние между величинами  $\lg \Delta T_{\text{раз1}}$  и  $\lg \Delta T_{\text{раз2}}$  имеет вид:

$$\lg \Delta T_{\text{раз2}} = \lg \Delta T_{\text{раз1}} + \lg(\tau_{a1} / \tau_{a2}) + 0,434(3,7(x_2^2 - x_1^2) + 4,35(x_2 - x_1)) \quad (9)$$

где, в свою очередь, значение  $\lg \Delta T_{\text{раз1}}$ , по (6), равно:

$$\lg \Delta T_{\text{раз1}} = \lg \Delta T_{\text{м1}} - \sigma_0 \Phi^{-1}(2P_1 - 1) \quad (10)$$

Тогда, подставляя в формулу (6) для  $P_2$  вместо  $\lg \Delta T_{\text{раз2}}$  его значение из (9) с учетом (10), получаем соответствующее выражение для нижней границы  $P_2$  доверительного интервала для вероятности различения мир при  $P_1 = 0,75$ :

$$P_2 = 0,5[1 + \Phi(e - q - s - p)];$$

$$e = \Phi^{-1}(2P_1 - 1) = \Phi^{-1}(0,5) = 0,675; \quad q = \lg(\tau_{a1} / \tau_{a2}) / \sigma_0;$$

$$s = \lg(\Delta T_{\text{м1}} / \Delta T_{\text{м2}}) / \sigma_0; \quad p = [0,4(\delta / A)^2 (D_2^2 - D_1^2) + 0,94(\delta / A)(D_2 - D_1)] / \sigma_0. \quad (11)$$

Для контрастно-ограниченного режима работы ВТА значение  $\Delta T_{\text{разi}}$  в (6) равно [2,3]:

$$\Delta T_{\text{разi}} = \Delta T_m E(x_i) / K_m \tau_{ai}; \quad K_m = (L'_2 - L'_1) / (L'_2 + L'_1), \quad (12)$$

где  $\Delta T_m$  – диапазон регистрируемой разности радиационных температур, К, определяемый рабочим диапазоном яркостей видеоконтрольного устройства  $\Delta L'_m = L'_2 - L'_1$ , кд/м<sup>2</sup>;  $K_m$  – коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, при  $L'_2 \gg L'_1$  близкий к 1.

При этом значение  $\Delta T_m$  должно удовлетворять условию [3]:

$$\Delta T_m \geq (\Delta T_\phi + 2\Delta T_R) \tau_a,$$

где  $\Delta T_\phi$  – максимальная величина вариаций радиационной температуры фоновых неоднородностей, К (нередко приближенно считают: летним солнечным днем  $\Delta T_\phi = 7$  К, облачным днем  $\Delta T_\phi = 4$  К, ночью  $\Delta T_\phi = 2$  К).

Относительную ТЧХ  $E(x_i)$  в (12) допустимо аппроксимировать следующей формулой (для  $x_i \geq 0,75$ ) [3]:

$$E(x_i) = 0,79\mu_i \exp[(305\xi_i / \Gamma^2 \delta^2 + 5,97)x_i^2];$$

$$\Gamma = \varphi \alpha Z \delta'_0 / \delta_0 \quad (13)$$

где  $\Gamma$  – видимое увеличение – отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта;  $\delta'_0$  – угловой размер элемента изображения, мрад, соответствующий  $\delta_0$ , при  $Z = 1$  (обычно  $\delta'_0 = 0,8-1$  мрад);  $\mu_p$ ,  $\xi_i$  – параметры аппроксимирующего выражения для функции порогового контраста глаза оператора, определяющей его контрастную

чувствительность, зависящие от яркости изображения фона  $L'$ , кд/м<sup>2</sup>, и углового размера изображения мира  $w'_i$ , град, равного  $w'_i = \Gamma h / 17,45 D_i$ .

Параметры  $\mu_i$ ,  $\xi_i$  в (13) представлены для ряда значений  $L'$  на рисунке в виде зависимостей  $\mu = f(w')$  и  $\xi = f(w')$ . При этом комфортная яркость изображения фона определяется условиями освещения при дешифрировании изображений, и ее можно принять равной [15]:  $L' = 0,3-1$  кд/м<sup>2</sup> (дешифрирование в темноте),  $L' = 3-30$  кд/м<sup>2</sup> (в полутьме),  $L' = 100$  кд/м<sup>2</sup> (на свету).

Из формул (12) и (13) вытекает выражение для  $\lg \Delta T_{\text{раз2}}$ :

$$\lg \Delta T_{\text{раз2}} = \lg \Delta T_{\text{раз1}} + \lg(\tau_{a1} / \tau_{a2}) + \lg(\mu_2 / \mu_1) + 0,434[(305\xi_2 / \Gamma^2 \delta^2 + 5,97)x_2^2 - (305\xi_1 / \Gamma^2 \delta^2 + 5,97)x_1^2], \quad (14)$$

где величина  $\lg \Delta T_{\text{раз1}}$  определяется по (10).

Аналогично, подставляя в формулу (6) вместо  $\lg \Delta T_{\text{раз2}}$  его значение из (14), получаем соответствующую формулу для нижней границы  $P_2$  доверительного интервала:

$$P_2 = 0,5[1 + \Phi(e - q - s - t - g)]; \quad t = \lg(\mu_2 / \mu_1) / \sigma_0;$$

$$g = 0,11(\delta^2 / A^2 \sigma_0)[(305\xi_2 / \Gamma^2 \delta^2 + 5,97)D_2^2 - (305\xi_1 / \Gamma^2 \delta^2 + 5,97)D_1^2] \quad (15)$$

Анализ (11), (15) свидетельствует, что не-

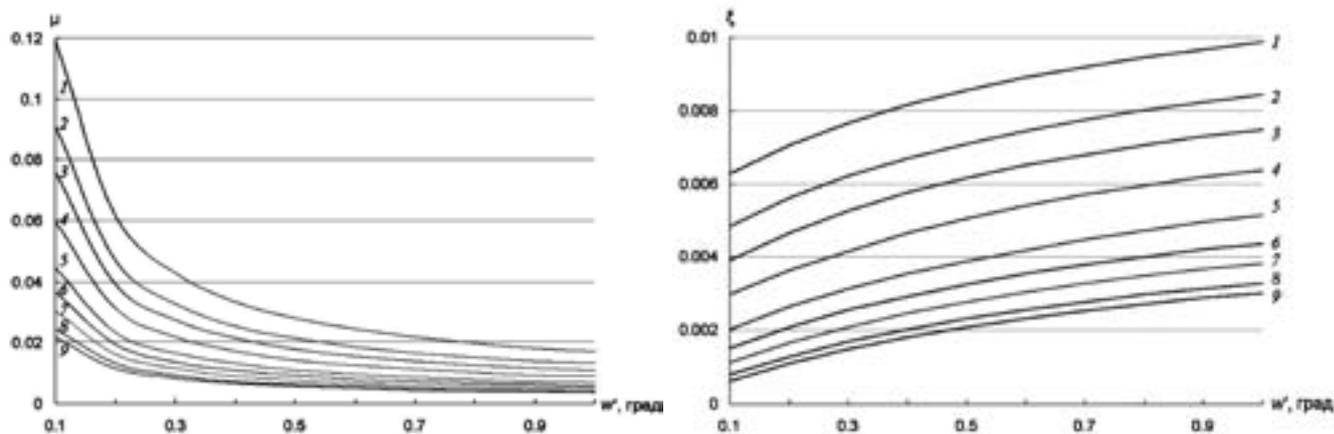


Рисунок 1.

Зависимости параметров  $\mu$  (а) и  $\xi$  (б) аппроксимационной формулы для ТЧХ от углового размера изображения мира  $w'$  для ряда значений яркости изображения фона  $L'$ : 1 –  $L' = 0,3$ , 2 –  $L' = 0,6$ , 3 –  $L' = 1$ , 4 –  $L' = 2$ , 5 –  $L' = 5$ , 6 –  $L' = 10$ , 7 –  $L' = 20$ , 8 –  $L' = 50$ , 9 –  $L' = 100$  кд/м<sup>2</sup>

избежная погрешность оценки коэффициентов пропускания атмосферы  $\tau_{ai}$  существенной роли не играет. Поэтому для приближенной оценки значений  $\tau_{ai}$  на вертикальных трассах в спектральных рабочих диапазонах ВТА 3-5 и 8-12 мкм можно воспользоваться следующей общей зависимостью, полученной по данным [16] для типовой модели атмосферы, соответствующей осенне-весеннему сезону при метеорологической дальности видимости 15 км (для  $D_i \leq 10-12$  км):

$$\tau_{ai} = \begin{cases} \exp(-0,4D_i^{0,35}) & (3-5 \text{ мкм}); \\ \exp(-0,15D_i^{0,5}) & (8-12 \text{ мкм}). \end{cases}$$

Тогда величина  $q$  в (11), (15) равна:

$$q = \begin{cases} 0,17(D_2^{0,35} - D_1^{0,35})/\sigma_0 & (3-5 \text{ мкм}); \\ 0,065(D_2^{0,5} - D_1^{0,5})/\sigma_0 & (8-12 \text{ мкм}) \end{cases} \quad (16)$$

Очевидно, при  $\Delta T_{m2} < \Delta T_{m1}$  и/или  $D_2 > D_1$  доверительная вероятность  $R(P \geq P_2)$ , отвечающая тепловому контрасту различаемых мир  $\Delta T_{m2}$  и дистанции до них  $D_2$ , повысится.

Таким образом, оценку значения доверительной вероятности  $R(P \geq P_1)$  в данном случае необходимо вести в следующем порядке:

- установить конкретный режим работы ВТА – шумо-ограниченный или контрастно-ограниченный, – обеспечивающий наблюдение мир;
- для выбранных согласно изложенным рекомендациям значений  $\Delta T_{m2}$  и  $D_2$  получить, с привлечением по операторов, оценку  $P^* = n/n_0$  вероятности различения мир;
- определить для исходной  $D_1$  и скорректи-

рованной  $D_2$  дистанции до мир и соответствующих нормированных и фактических погодных условий коэффициенты пропускания атмосферы  $\tau_{a1}$  и  $\tau_{a2}$  или же сразу рассчитать по (16) значение  $q$ ;

- для эффективного значения элементарного поля зрения ВТА  $\delta$  и требуемого разрешения на местности  $A$  рассчитать по (11) или (15) нижнюю границу доверительного интервала  $P_2$ ;

- по формуле (2), (3) или (4), приняв  $P_1 = P_2$ , вычислить искомую доверительную вероятность  $R(P \geq P_1)$  для вероятности различения мир в нормированных условиях, отвечающую первоначальным (заданным) значениям теплового контраста мир  $\Delta T_{m1}$  и дистанции до них  $D_1$ .

Именно по величине  $R(P \geq P_1)$  и следует оценивать результаты контроля данной ВТА, т.е. считать ее удовлетворяющей требованиям технического задания по разрешению на местности, если значение  $R(P \geq P_1) \geq R_{min}$ .

При использовании в полевых условиях пассивных, непогреваемых, мир возможность выбора значений их теплового контраста обычно отсутствует, и тогда повышение достоверности контроля достигается путем изменения лишь дистанции до мир  $D_2$ .

При этом в формулах (11), (15) следует принять  $s = 0$ .

При контроле разрешения на местности ВТА в стендовых условиях длина  $h_m$ , мм, и ширина  $A_m$ , мм, полос соответствующей эк-

вивалентной миры, устанавливаемой в фокальной плоскости коллиматора, должны составлять:

$$h_m = hf_k/D; \quad A_m = Af_k/D,$$

где  $f_k$  – фокусное расстояние коллиматора, м, а первоначальный тепловой контраст миры  $\Delta T_{m1}$  должен быть равен:

$$\Delta T_{m1} = \Delta T_R \tau_a / \tau_k$$

где  $\tau_k$  – коэффициент пропускания объектива коллиматора в спектральном рабочем диапазоне ВТА.

Для повышения достоверности контроля здесь приходится ограничиться лишь снижением величины теплового контраста миры. При этом в формулах (11), (15) необходимо принять  $q = p = t = g = 0$ .

Кроме того, следует исключить заметное влияние на результаты измерений абберационного пятна рассеяния коллиматора, для чего необходимо, чтобы диаметр  $d_k$ , мкм, этого пятна удовлетворял условию [17]:  $d_k/f_k < 0,4\delta_0$ . При этом если диаметр объектива коллиматора превышает диаметр объектива ВТА, то дифракционное пятно рассеяния коллиматора принципиально не будет оказывать какого-либо влияния на результаты измерений, поскольку объективы коллиматора и ВТА представляют собой единую оптическую систему.

#### ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ

Требуется проконтролировать для шумограниченной ВТА, работающей в диапазоне спектра 8-12 мкм и имеющей эффективное элементарное поле зрения  $\delta = 0,25$  мрад, реализацию требуемого разрешения на местности  $A = 1$  м, определяемого для дистанции  $D_1 = 5$  км и теплового контраста эквивалентной миры  $\Delta T_{m1} = 2$  К. Контроль проводим в следующем порядке:

- для заданных значений дистанции  $D_1$  до различаемых мир – эквивалентной и альтернативной – и их теплового контраста  $\Delta T_{m1}$  с привлечением, например, пяти высококвалифицированных экспертов (четыре из ко-

торых миры различили) оцениваем вероятность различения этих мир:  $P^* = 4/5 = 0,8$ ;

- увеличиваем дистанцию до мир и/или уменьшаем их тепловой контраст таким образом, чтобы экспертная оценка вероятности различения мир еще не снизилась; допустим, что это требование выполняется при  $D_2 = 5,1$  км и  $\Delta T_{m2} = 1,9$  К;

- для СКО  $\sigma_0 = 0,13$  рассчитываем по (16) значение  $q = 0,01$ , по (11) - значения  $s = 0,17$  и  $p = 0,375$  и, далее, нижнюю границу доверительного интервала  $P_2 = 0,55$ ;

- приняв  $P_1 = P_2 = 0,55$ , вычисляем по (4) искомую доверительную вероятность  $R(P \geq P_1) = 0,84$ , отвечающую заданным значениям дистанции до мир  $D_1 = 5$  км и их теплового контраста  $\Delta T_{m1} = 2$  К.

Следовательно, с доверительной вероятностью  $R = 0,84$  можно утверждать, что для вероятности различения мир в нормированных условиях имеет место соотношение  $P \geq 0,75$  и, значит, вероятность разрешения  $P_{раз}$  эквивалентной миры с периодом  $A$  по ее изображению не меньше заданной:  $P_{раз} \geq 0,5$ . Таким образом, в данном случае разрешение на местности ВТА соответствующим требованиям вполне достоверно удовлетворяет.

Отметим, что если бы были задействованы всего два оператора и оба они после такой же корректировки теплового контраста мир и дистанции до них эти миры различили, то, согласно формуле (3), была бы достигнута практически та же самая доверительная вероятность:  $R = 0,83$ .

#### ВЫВОДЫ

1. Прямому контролю вероятности или дальности вскрытия объектов посредством ВТА сопутствуют большие погрешности, обусловленные зависимостью этих показателей эффективности от большого числа трудноучитываемых и непредсказуемых факторов, поэтому ВТА обычно характеризуется и, соответственно, аттестуется по величине разрешения на местности – полупериода разрешаемой эквивалентной миры. При этом критерием реализации требуемого

разрешения на местности ВТА может служить превышение вероятностью разрешения эквивалентной миры по ее изображению значения 0,5.

2. Для ослабления влияния субъективных факторов, связанных с процедурой разрешения операторами эквивалентной миры, задачу разрешения этой миры целесообразно свести к задаче различения двух мир – четырехполосной эквивалентной и пятиполосной альтернативной, имеющей те же самые габаритные размеры и тепловой контраст, но с шириной полос в  $9/7 = 1,29$  раза меньшей.

3. Поскольку состав экспертной группы, статистически оценивающей вероятность различения этих мир по их тепловизионным изображениям, как правило, невелик, для повышения достоверности контроля, определяемой доверительной вероятностью того, что вероятность разрешения эквивалентной миры по ее изображению действительно не меньше 0,5, разность температур полос различаемых мир и фона целесообразно уменьшить и/или дистанцию до этих мир увеличить до уровня, при котором экспертная оценка вероятности различения данных мир еще не снижается. При этом контроль может проводиться в погодных условиях, отличных от нормированных, и данное обстоятельство существенно расширяет возможности практического применения предложенной методики контроля.

#### Список литературы:

1. *Замшин В.В.* Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений // Изв. ВУЗов. Сер. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2014. – № 1. – С. 43-51.

2. *Балоев В.А., Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. унта, 2015. – 424 с.

3. *Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Особенности рационального выбора основных параметров объективов современных тепловизионных приборов // Оптический журнал. – 2017. – № 3. – С. 23-25.

4. *Комаров А.И., Котельников В.А.* К вопросу прогнозирования фактического линейного разрешения на местности при разработке перспективных оптико-электронных космических аппаратов // Геодезия и картография. – 2008. – № 12. – С. 42-46.

5. *Gerken M., Schlemmer H., Munzberg M.* Unified characterization of imaging sensor from VIS through LWIR // Proc. SPIE. – 2016. – V. 9820. – P. 98200G-1 – 98200G-10.

6. *Березин Н.П., Кононов В.И.* Разрешающая способность: история, состояние и развитие // Оптико-механическая промышленность. – 1991. – № 11. – С. 33-37.

7. *Журкин И.Г., Шавенько Н.К.* Информационный подход к оценке качества изображений // Исследование Земли из космоса. – 2001. – № 2. – С. 24-29.

8. *Beintema J., Bijl P., Hogervorst M., Dijk J.* Target acquisition performance: effect of target aspect angle, dynamic imaging and signal processing // Proc. SPIE. – 2008. – V. 6941. – P. 69410C-1 – 69410C-12.

9. *Зрюмов Е.А., Пронин С.П.* Применение фракталов для контроля качества оптико-электронных систем // Вооружение. Политика. Конверсия. – 2009. – № 5. – С. 35-38.

10. *Holst G.* Testing and evaluation of IR imaging systems. 2 ed. – USA: SPIE press, 1998. – 422 p.

11. *Webb C., Halford C.* Dynamic minimum resolvable temperature testing for staring array imagers // Optical Engineering. – 1999. – № 5. – P. 845-851.

12. *Bijl P., Valetton J.* Bias-free procedure for the measurement of the MRTD // Optical Engineering. – 1999. – № 10. – P. 1735-1742.

13. *Щукин А.Н.* Теория вероятностей и ее применение в инженерно-технических расчетах. – М.: Сов. радио, 1974. – 136 с.

14. *Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н., Коровина И.А.* Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1970. – 536 с.

15. *Holst G.* Electro-optical imaging system performance. 3 ed. – US: SPIE press, 2003. – 442 p.

16. *Москаленко Н.И., Мирумьянц С.О.* Атлас спектров прозрачности по произвольно ориентированным трассам атмосферы. – М.: ЦНИИ информации, 1979. – 494 с.

17. *Chrzanowski K., Lee H., Wrona W.* A condition on spatial resolution of IR collimators for testing of thermal imaging systems // Optical Engineering. – 2000. – № 5. – P. 1413-1417.

# РЕПЛИЦИРОВАННАЯ АСФЕРИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО И МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

ЛУКИН А.В., МЕЛЬНИКОВ А.Н., АХМЕТОВ М.М., БЕРДЕННИКОВ А.В., ГАЙНУТДИНОВ И.С.,  
ЖДАНОВА А.В.\*, ИВАНОВ В.П., ЛИСОВА Е.Г., МОГИЛЮК И.А.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

\*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения», г. Санкт-Петербург

E-mail: gipo@telebit.ru, anastacia.zhdanova@gmail.com

*Рассматриваются основные аспекты организации серийного и массового производства асферической оптики методом прецизионной репликации на основе использования асферических мастер-матриц и малоусадочных полимеризующихся композиций с применением лазерно-голографических средств технологического и аттестационного контроля формы рабочей поверхности мастер-матриц. Предложена иерархическая система изготовления и применения мастер-матриц в этой технологии. На примере изготовления и исследования опытной партии двояковыпуклой асферической комбинированной линзы продемонстрированы основные отличительные особенности этой технологии.*

**Ключевые слова:** асферическая оптика, технология репликации, мастер-матрица, фотополимеризация, лазерно-голографический контроль.

На базе научно-производственного центра АО «НПО ГИПО» могут быть достигнуты следующие технические характеристики реплицированной асферической оптики [1]:

- диапазон диаметров оптических деталей от 20 до 200 мм (диапазон определяется возможностями используемого технологического оборудования для изготовления мастер-матриц и подложек деталей и в перспективе может быть значительно расширен);

- наибольшая крутизна асферических поверхностей – до 30°;

- асферичность – до 1000 мкм (ограничение отсутствует при использовании предварительно асферизованных подложек, а в случае использования сферических подложек может быть существенно снижено путем применения малоусадочных полимеров);

- высокая идентичность (одинаковость)

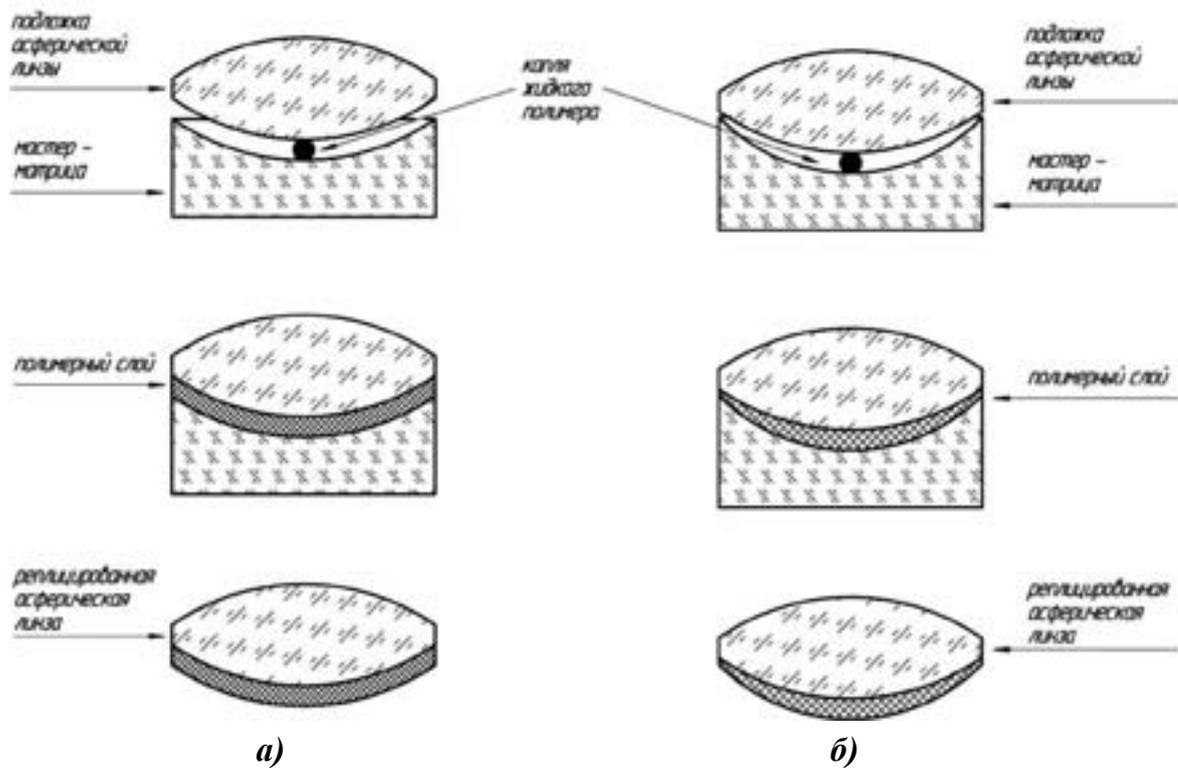
реплицированных поверхностей, что особенно важно для серийной технологии и для снижения времени сборочных операций.

Следует отметить, что отличительные особенности технологии формообразования асферики методом репликации так же могут быть эффективно реализованы при изготовлении деталей из:

- пятнаемых стекол;
- токсичных оптических материалов.

Особые требования предъявляются к полимеризующимся композициям [2]:

- высокая адгезия к материалу подложки;
- малоусадочность;
- заданный рабочий спектральный диапазон (пропускание);
- механическая и термическая прочность;
- заданные оптические свойства (показатель преломления, дисперсия).



**Рисунок 1.**

**Упрощенная принципиальная схема процесса репликации выпуклой асферической поверхности двояковыпуклой линзы:**

- а) – форма рабочей поверхности подложки так же асферическая (близкая по форме к рабочей поверхности мастер-матрицы), поэтому полимерный слой во всех зонах имеет приблизительно равную толщину и влиянием его усадок можно пренебречь;**  
**б) – копирование на ближайшую трехточечную сферу; полимерный слой в различных зонах светового диаметра имеет разную толщину, и его усадки вызывают соответствующие aberrации**

На рис. 1 приведена упрощенная принципиальная схема процесса репликации выпуклой асферической поверхности двояковыпуклой линзы в условиях равнотолщинного и разнотолщинного слоев полимеризующейся композиции.

Из рис. 1а видно, что предварительная асферизация рабочих поверхностей подложки снимает ограничения по асферичности, обусловленные «вредными» эффектами усадки полимеризующейся композиции, в то время как при использовании подложки с формой рабочей поверхности в виде ближайшей трехточечной сферы (см. рис. 1б) эти ограничения становятся первостепенными. В обоих случаях, как показывает практика, целесообразно использовать подложки с шероховатыми (тонкая шлифовка) рабочими поверхностями. Это, как правило, снижает

себестоимость формообразования и одновременно повышает адгезию полимерного слоя к подложке.

При изготовлении прецизионных асферических мастер-матриц необходимо обеспечить:

- воспроизведение уравнения асферической поверхности с заданным значением среднеквадратичного отклонения (СКО);
- заданный класс чистоты рабочей поверхности;
- высокую механическую прочность и износостойкость рабочей поверхности;
- подбор и оптимизацию физико-химических свойств антиадгезионных материалов.

Примечание: В случае невозможности обеспечения равнотолщинного слоя полимера (рабочая поверхность подложки – ближайшая сфера) и значительной асферичности

(более 10 мкм) влияние усадок полимеризующейся композиции можно существенно снизить путем соответствующей коррекции исходной формы рабочей поверхности мастер-матрицы.

Считаем целесообразным ввести и реализовать иерархию в системе классификации мастер-матриц, аналогичную принятой в системе классификации пробных стекол [3, 4]:

- пара образцовых мастер-матриц (выпуклая и вогнутая);

- контрольная мастер-матрица (либо выпуклая, либо вогнутая в зависимости от формы рабочей мастер-матрицы);

- рабочая мастер-матрица (либо вогнутая, либо выпуклая в зависимости от формы изготавливаемой детали).

Контрольные и рабочие мастер-матрицы могут быть изготовлены методом репликации с образцовых мастер-матриц, что обеспечит высокую идентичность их рабочих поверхностей, высокую производительность и низкую себестоимость процесса формообразования.

Очевидно, реализация в полной мере предложенной иерархической классификации мастер-матриц целесообразна лишь при массовом и длительном (многолетнем) производстве оптических деталей. В случае крупных, но разовых партий реплицируемых деталей оптимально будет изготовление пары образцовых мастер-матриц и непосредственно с них необходимого количества рабочих мастер-матриц.

Следует отметить, что если в технологическом процессе серийного и массового производства асферической оптики применяется фотополимеризующаяся композиция, то количество прозрачных мастер-матриц минимальное, а если применяется композиция с химической полимеризацией, то могут использоваться и непрозрачные мастер-матрицы, причем их количество должно быть значительно больше, чем в первом случае.

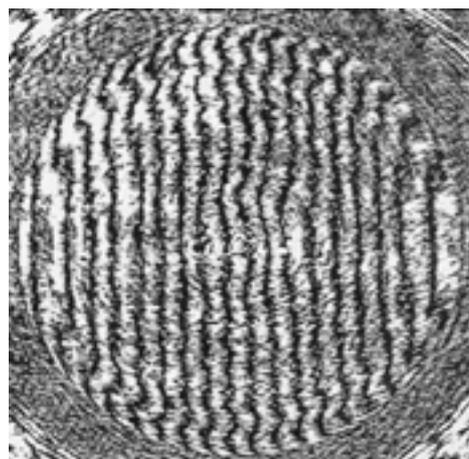
Примером успешной практической реализации технологии репликации служит двояковыпуклая асферическая комбинированная линза (АКЛ), конструкция кото-

рой разработана в АО «НПО ГИПО». Она выполняет функцию однокомпонентного коллиматорного объектива в рабочем спектральном диапазоне 600 – 1400 нм. Изготовлена опытная партия таких линз. АКЛ имеет симметричную конструкцию с двумя идентичными асферическими рабочими поверхностями, выполненными путем прецизионной репликации в тонком полимерном слое, на которые нанесено просветляющее покрытие с остаточным коэффициентом отражения не более 0,2 % на заданной длине волны 780 нм.

Основные параметры этой АКЛ:

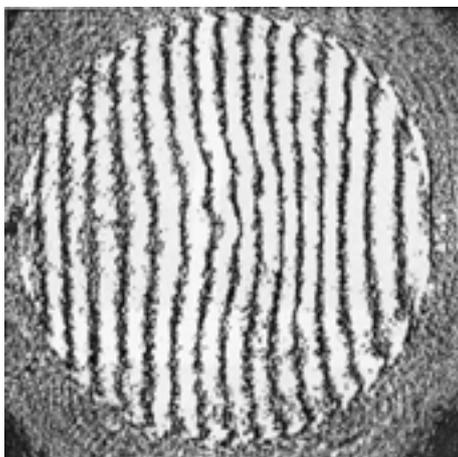
- материал подложки – стекло К8;
- конструктивный диаметр – 22 мм;
- толщина по оси – 5,1 мм;
- относительное отверстие 1:1,8;
- задний отрезок – 37 мм;
- СКО не более 70 нм.

На рис. 2 представлена интерферограмма вогнутой асферической рабочей поверхности мастер-матрицы, при помощи которой была изготовлена опытная партия АКЛ. Из рис. 2 видно, что остаточные технологические дефекты имеют преимущественно зональный характер и осевую симметрию, причем максимальная местная ошибка не превышает одной интерференционной полосы.



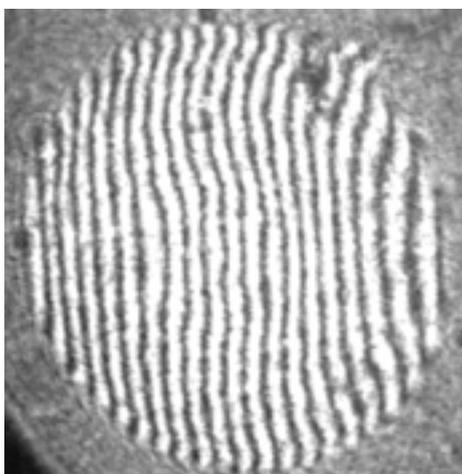
*Рисунок 2.*

*Интерферограмма вогнутой асферической рабочей поверхности мастер-матрицы, полученная в интерферометре типа Тваймана-Грина (СКО волнового фронта не более 60 нм, длина волны 632,8 нм)*



**Рисунок 3.**

*Интерферограмма АКЛ, полученная в интерферометре типа Маха-Цендера (однократное прохождение светового пучка через контролируемую АКЛ); подложка линзы с предварительной асферизацией обеих рабочих поверхностей (СКО не более 70 нм, длина волны 632,8 нм)*

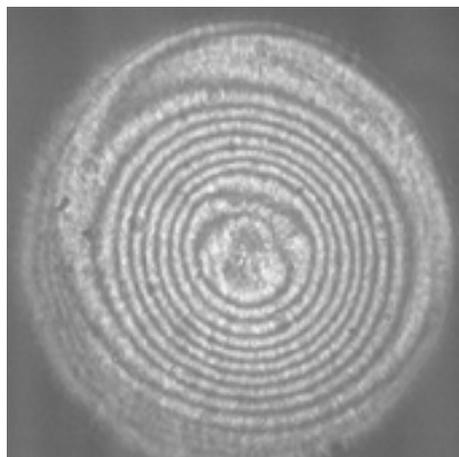


**Рисунок 4.**

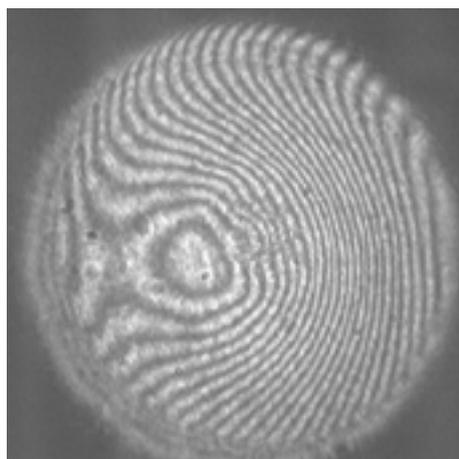
*Интерферограмма АКЛ, полученная в интерферометре типа Тваймана-Грина; подложка линзы с предварительной асферизацией обеих рабочих поверхностей*

Из сопоставления интерферограмм, представленных на рис. 2 и 3, можно заметить наличие корреляции в зональных дефектах мастер-матрицы и АКЛ.

Влияние усадок при использовании подложек линз без предварительной асферизации было выявлено методом многократного копирования [5]. В данном эксперименте в качестве образца сравнения использована АКЛ, полученная на предварительно асферизованной подложке (см. рис. 4).



**а)**



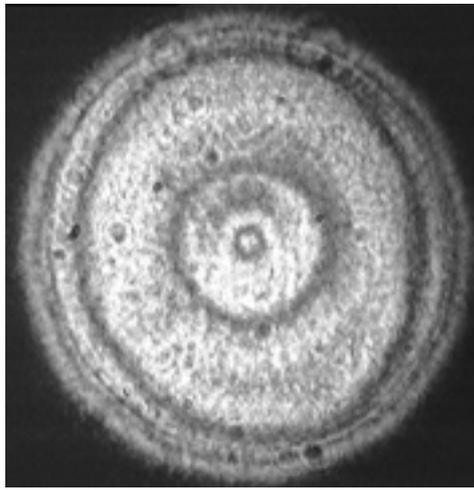
**б)**

**Рисунок 5.**

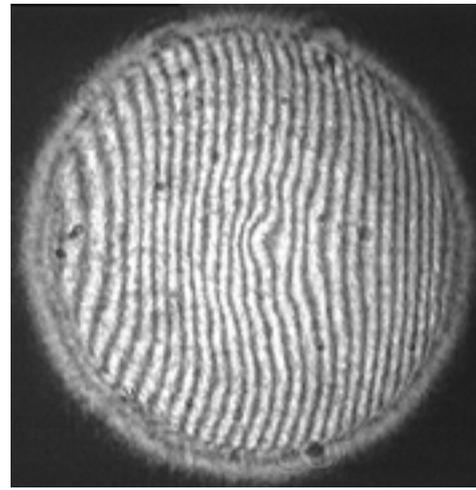
*Интерферограммы АКЛ, полученные в интерферометре типа Тваймана-Грина; подложка линзы с ближайшей трехточечной сферой, копирование однократное:  
а) – настройка на бесконечно широкую полосу;  
б) – настройка на полосы конечной ширины*

На рис. 5 – 7 представлены интерферограммы асферических комбинированных линз, рабочие поверхности которых были изготовлены при однократном, двукратном и трехкратном копировании соответственно.

Микрофотография кружка рассеяния АКЛ иллюстрирует дифракционный характер распределения энергии в нем и подтверждает достаточно высокое оптическое качество этой линзы (рис. 8).



*а)*



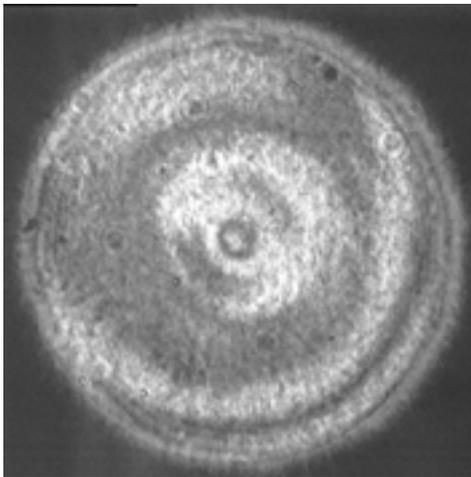
*б)*

**Рисунок 6.**

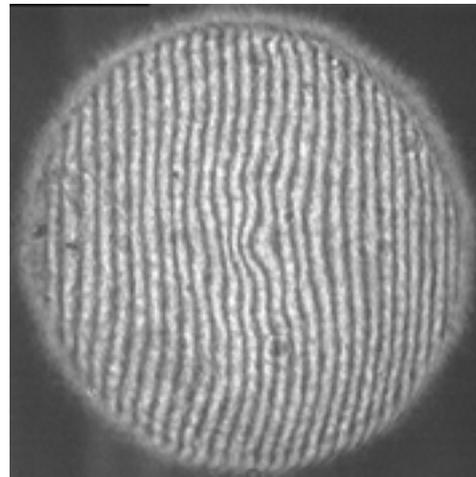
**Интерферограммы АКЛ, полученные в интерферометре типа Тваймана-Грина; подложка линзы с ближайшей трехточечной сферой, копирование двукратное:**

***а) – настройка на бесконечно широкую полосу;***

***б) – настройка на полосы конечной ширины***



*а)*



*б)*

**Рисунок 7.**

**Интерферограммы АКЛ, полученные в интерферометре типа Тваймана-Грина; подложка линзы с ближайшей трехточечной сферой, копирование трехкратное:**

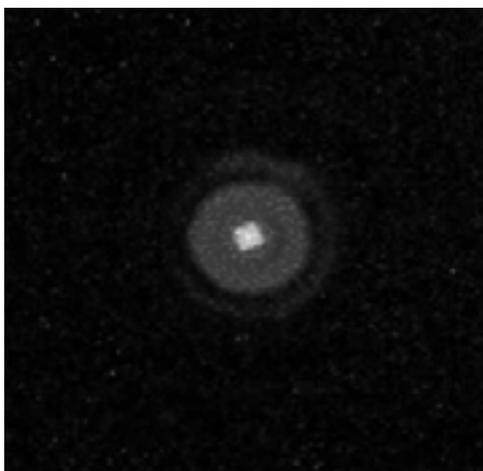
***а) – настройка на бесконечно широкую полосу;***

***б) – настройка на полосы конечной ширины***

К достоинствам конструкции этой АКЛ можно отнести также:

- её симметричность;
- применение лишь одной мастер-матрицы для репликации обеих рабочих поверхностей;
- двукратное уменьшение асферичности за счет использования двухсторонней асферики;
- отсутствие вероятности неправильной сборки.

Таким образом, рассмотренные в данной статье основные аспекты и проблемы организации в АО «НПО ГИПО» серийного и массового производства асферической оптики методами реплицирования с учетом имеющегося научно-технологического задела, а также соответствующего дооснащения, – подтверждают реальную возможность полностью обеспечить в ближайшие 2 – 3 года потребности отечественных производителей оптических и оптико-электрон-



**Рисунок 8.**  
**Микрофотография**  
**кружка рассеяния двояковыпуклой АКЛ**  
( $\lambda = 632,8$  нм, диаметр кружка рассеяния – 4 мкм,  
увеличение ~1000 крат)

ных приборов и систем различного назначения в данном виде комплектующих изделий (линзы и зеркала с асферическими рабочими поверхностями).

Это послужит также действенным стимулом к росту применения асферической оптики в серийной продукции отечественного приборостроения и, тем самым, к повышению ее конкурентоспособности на мировом рынке.

*Список литературы:*

1. Ахметов М.М., Белозёров А.Ф., Балоев В.А., Белокопытов А.А., Гайнутдинов И.С., Иванов В.П., Лукин А.В., Мельников А.Н., Могилюк И.А. Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики // *Контенант*. - 2016. - Т. 15. - № 3. С. 39 – 42.
2. Жданова А.В., Михайлов В.Н., Бабкин О.Э., Лукин А.В., Мельников А.Н. Малоусадочные фотополимеризующие композиции для прецизионной репликации элементов дифракционной и асферической оптики. Первые результаты и перспективы / *Инновационные материалы и технологии в дизайне: Сборник тезисов докладов III Всероссийской научно-технической конференции с участием молодых ученых, 23-24 марта 2017 г.* – СПб.: СПбГИКиТ, 2017. С. 26 – 27.
3. ГОСТ 2782-82. Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1982. 10 с.
4. Карлин О.Г., Кукс В.Г., Липовецкий Л.Е., Лукин А.В., Мустафин К.С., Хабиров А.З., Хуснутдинов А.Г. Изготовление и контроль асферической оптики. – М.: ЦНИИ информации, 1980. 272 с.
5. Бейнарович Л.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В. Голографический способ контроля выпуклых асферических поверхностей // *А.с. СССР №721672 от 12.09.1977 г. Бюл. изобр. № 10, 1980.*

# ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

ГУСЕВ А.Г., КОЛЬЦОВ А.Ю., ХАСАНОВ А.М.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru, anastacia.zhdanova@gmail.com

*Представлены результаты расчета блокирующего фильтра, работающего в инфракрасной области спектра для применения в широком диапазоне температур и не изменяющего при этом свою спектральную характеристику. Данный тип фильтра рассчитывался путем оптимизации показателя преломления слоев и их толщины. Полученные результаты были использованы при разработке термостабильных интерференционных блокирующих фильтров.*

**Ключевые слова:** термостабильный фильтр, блокирующий коротковолновый фильтр, спектральные характеристики, Ge-ZnSe, PbTe.

С каждым годом увеличиваются требования к современным оптико-электронным приборам, при создании которых необходима разработка совершенно новых оптических фильтров, работающих в широком диапазоне температур и сохраняющих при этом свои спектральные характеристики. Сложность разработки данного типа фильтров обусловлена разнонаправленным изменением в зависимости от температуры показателя преломления, а также оптической толщины покрытия для разных типов материалов. Была поставлена задача разработки коротковолнового блокирующего фильтра, работающего в спектральном диапазоне 5-12 мкм при температуре от минус 196°С до 25°С с изменением границы отрезания не более 0,05 мкм.

При расчете спектральных характеристик многослойных интерференционных систем задаются показатели преломления слоев  $n_i$  и их оптические толщины  $g_i$ . Изменения показателя преломления, а также толщины слоев от температуры можно определить как:

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT} \Delta T,$$

где  $\frac{dn}{dT}$  - температурный коэффициент изменения показателя преломления;

$n_0$  - показатель преломления при температуре 25 °С;

$\Delta T$  - изменение температуры.

$$h = h_0 + \frac{dh}{dT} \Delta T,$$

где  $\frac{dh}{dT}$  - температурный коэффициент расширения материала слоя пленки;

$h_0$  - первоначальная геометрическая толщина слоя пленки.

Так как  $\frac{dn}{dT}$ ,  $\frac{dh}{dT}$  в данном диапазоне температур малы, оптическая толщина слоя  $g = n \cdot h$ , в приближении первого порядка будет определена выражением:

$$g = g_0 \left( 1 + \frac{\alpha_h}{h_0} \Delta T + \frac{\alpha_n}{n_0} \Delta T \right),$$

где  $g_0$  - первоначальная оптическая толщина;  $\alpha_n$  - коэффициент изменения показателя преломления от температуры;

$\alpha_h$  - температурный коэффициент расширения.

Изменение оптической толщины пленок в ограниченном спектральном диапазоне при

заданном изменении  $\Delta T$  можно записать в упрощенном виде

$$g = g_0 \cdot k,$$

где  $k$  – коэффициент изменения оптической толщины пленки от температуры, определяется экспериментально для данного диапазона длин волн.

Нами были экспериментально определены изменения показателя преломления и коэффициента изменения оптической толщины слоев пленкообразующих материалов ZnSe, PbTe, Ge при изменении температуры от минус 196°C до 25°C [1]. Измерения проводились в диапазоне длин волн 5-12 мкм.

Спектральные характеристики пропускания образцов согласно методике измерялись при комнатной температуре 25°C и при температуре минус 196°C [2].

Расчет оптических постоянных проводился по огибающим точек экстремумов [1],[3].

По положению точек экстремумов рассчитывалась оптическая толщина пленок при разных температурах. Измерения проводились в диапазоне длин волн 5-12 мкм.

Для пленок ZnSe показатель преломления составил  $n=2,35$  при 25°C и  $n=2,25$  при минус 196°C. Коэффициент изменения оптической толщины составил  $k=1$  при 25°C и  $k=0,96$  при минус 196°C.

Для пленок PbTe показатель преломления составил  $n=5,3$  при 25°C и  $n=5,6$  при минус 196°C. Коэффициент изменения оптической толщины составил  $k=1$  при 25°C и  $k=1,055$  при минус 196°C.

Для пленок Ge показатель преломления изменялся от  $n=3,9$  при 25°C до  $n=3,8$  при минус 196°C.

Коэффициент изменения оптической толщины составил  $k=1$  при 25°C и  $k=0,977$  при минус 196°C.

Отметим разнонаправленное изменение оптической толщины пленок ZnSe, Ge и PbTe, что может приводить к значительным изменениям спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий.

На рис. 1 приведены расчетные спектральные характеристики блокирующего корот-

коволнового фильтра на основе 13 слоев PbTe-ZnSe, измеренные при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  и  $T_2 =$  минус 196°C.

Изменение отношения показателя преломления

$$\frac{n_{PbTe}}{n_{ZnSe}}$$

от 2,26 до 2,49 приводит к уширению полосы блокировки отрезающих фильтров и к сдвигу полосы отрезания по уровню  $0,5\tau_{max}$  на  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,0543 \cdot \lambda_{ну}^{0,5}$ ,

где  $\tau_{max}$  – максимальное пропускание фильтра в области прозрачности;

$\lambda_{ну}$  - длина волны границы отрезания при  $T=25^\circ\text{C}$ , по уровню  $0,1\tau_{max}$  на  $\Delta\lambda_{0,1} = 0,05 \cdot \lambda_{гг}^{0,1}$  в длинноволновую область. Из-за разнонаправленности изменения оптических толщин слоев PbTe, ZnSe сдвиг длинноволновой границы фильтра, связанный с изменением оптических толщин от температуры, незначителен.

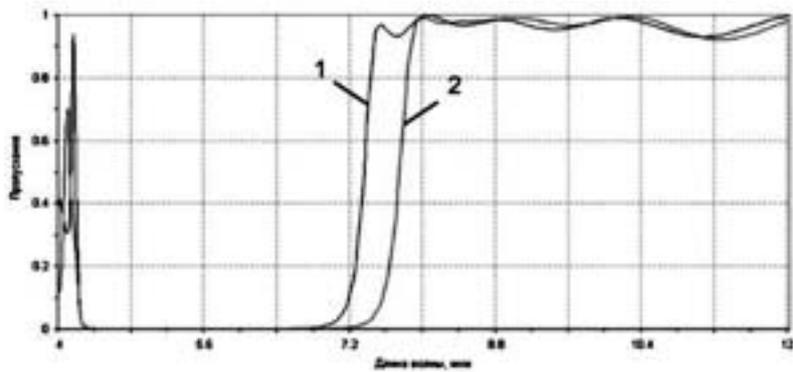
На рис. 2 приведены расчетные спектральные характеристики блокирующего коротковолнового фильтра на основе 15 слоев Ge-ZnSe, измеренные при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  и  $T_2 =$  минус 196°C.

Изменение отношения показателя преломления

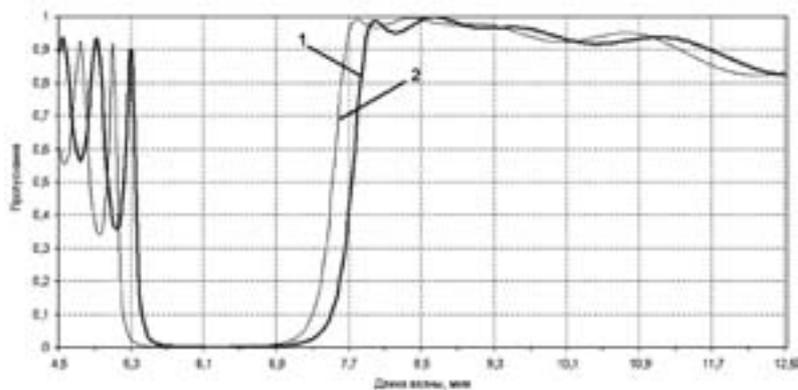
$$\frac{n_{Ge}}{n_{ZnSe}}$$

от 1,66 до 1,69 приводит к незначительному уширению полосы блокировки отрезающего фильтра, но уменьшение оптических толщин слоев Ge ( $k=0,977$ ) и ZnSe ( $k=0,96$ ) приводит к значительному смещению длинноволновой границы фильтра по уровню  $0,5\tau_{max}$  на  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,029 \cdot \lambda_{гг}^{0,5}$ , по уровню  $0,1\tau_{max}$  на  $\Delta\lambda_{0,1} = 0,03 \cdot \lambda_{гг}^{0,1}$  в коротковолновую область.

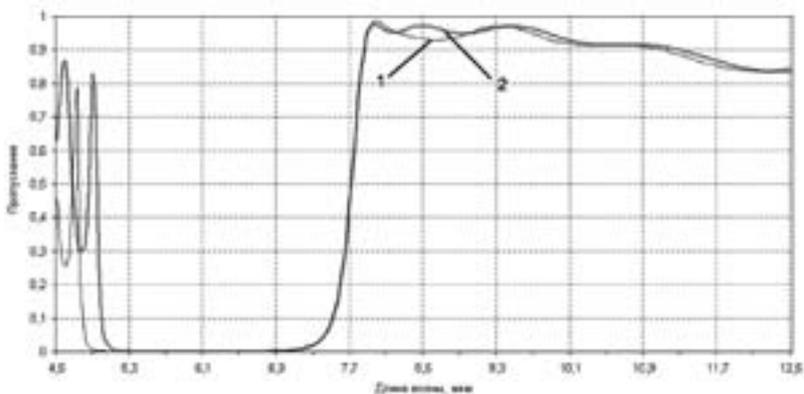
Так как пленки PbTe и Ge имеет разнонаправленное изменение показателя преломления и оптической толщины, то возможно создание слоя с высоким показателем преломления путем комбинирования слоев PbTe–Ge, в паре с ZnSe с низким показателем преломления для изготовления термостабильных фильтров.



**Рисунок 1.**  
**Фильтр блокирующий коротковолновый на основе PbTe-ZnSe**  
 1 - при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ; 2 - при  $T_2 = \text{минус } 196^\circ\text{C}$



**Рисунок 2.**  
**Фильтр блокирующий коротковолновый на основе Ge-ZnSe**  
 1 - при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ; 2 - при  $T_2 = \text{минус } 196^\circ\text{C}$



**Рисунок 3.**  
**Расчетная спектральная характеристика термостабильного фильтра.**  
 1 - при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ; 2 - при  $T_2 = \text{минус } 196^\circ\text{C}$

Нами были исследованы эквивалентные слои  $\text{Ge}_x - \text{PbTe}_y - \text{Ge}_z$ ,  $\text{PbTe}_x - \text{Ge}_y - \text{PbTe}_z$ . Составлена программа оптимизации расчета конструкции термостабильных фильтров путем варьирования соотношения компонентов эквивалентного слоя.

На рис. 3 приведены расчетные спектральные характеристики блокирующего коротковолнового фильтра на основе 17 слоев  $(\text{Ge}_{1,1} - \text{PbTe}_{0,8} - \text{Ge}_{1,1}) - \text{ZnSe}$ , измеренные при  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  и  $T_2 = \text{минус } 196^\circ\text{C}$ .

Практическая реализация данного термостабильного отрезающего фильтра показала правильность подхода. Смещение границы в длинноволновую область составило менее 0,02 мкм при изменении температуры от минус  $196^\circ\text{C}$  до  $25^\circ\text{C}$ .

#### *Список литературы:*

1. Кольцов А.Ю., Хасанов А.М., Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г., Потапов Р.И. Оптические свойства пленок  $\text{PbTe-ZnSe}$  при криогенных температурах. // Контенант. – 2015. – Т.14 - №2.- С.46.
2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. – Казань: Издательство «Фэн», 2003. – С. 14-33.
3. Несмелов Е.А, Гусев А.Г., Иванов О.Н., Матшин Н.П. Метод расчета оптических постоянных тонких диэлектрических пленок // ОМП. – 1991, №9. – С.27-29.