

## КОНТЕНАНТ

Том 14, № 1, 2015

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Учредитель и издатель – Общественная академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

### СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ	
Малькин А.А. Моделирование температурной зависимости показателей преломления отечественных марок стёкол в программе ZEMAX	3
РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ Абдулкадыров М.А., Владимиров Н.М., Добриков Н.С., Патрикеев В.Е., Семенов А.П. Оптимизация конструкции сверхоблегченных астрономических и космических зеркал	8
Дробот А.С., Абрамешин В.В., Давиденко В.П., Кодинцева Е.В. Разработка низкоуровневых телевизионных камер, применяемых в объектах специального назначения	13
Полещук А.Г., Корольков В.П., Насыров Р.К. Дифракционные оптические элементы: методы изготовления и практическое применение	10
Коронин Ю.Н., Касаткин И.В. История развития основных схемотехнических решений построения тепловизионных каналов для объектов БТТ на примере разработок ОАО «Швабе-Приборы» и ОАО «Швабе-Оборона и Защита»	20
Бессмельцев В.П., Достовалов А.В. Лазерные технологии формирования сеток	28
Широков Р. И., Алехнович В.И. Юстировка оптических локационных станций в системе сферического обзора	32
Широков Р. И., Алехнович В.И. Увеличение углов поля зрения составной веб-камеры методом склеивания изображений	40
ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ	
Осипович И.Р. Определение интегрального коэффициента пропускания объективов тепловизионных систем в условиях производ- ственного контроля	46
Кулакова Н.Н., Мишин С.В. Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, рас- познавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам	49
ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ	
Васильева С.Н., Грималюк М.В.,	
Ломакин Ю.В., Подобрянский А.В.	
к вопросу центритрования линз кольцевым алмазным инструментом	54
r <i>J</i>	



## КОНТЕНАНТ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## СОДЕРЖАНИЕ

#### (продолжение)

Васильева С.Н., Глухов Ю.А., Грималюк М.В., Ломакин Ю.В., Подобрянский А.В. Некоторые аспекты прецизионной обработки поверхностей оптических деталей кольцевым алмазным инструментом	63
<b>Горшков В.А., Савельев А.С., Невров А.С., Корнеев Н.Г.</b> Автоматизированные доводочные станки для формообразования высокоточной асферической оптики, в том числе внеосевых зеркальных коллиматоров	76
Горшков В.А., Корнеев Н.Г. Внеосевые зеркальные коллиматоры с рабочим полем 200÷1000 мм для контроля качества оптико-электронных комплексов	79
Васильева Е.Ю., Горшков В.А., Чурилин В.А. Многоспектральная установка на базе внеосевого зеркально- го коллиматора для контроля качества оптических систем	82
Васильева С.Н., Глухов Ю.А., Грималюк М.В., Ломакин Ю.В., Подобрянский А.В. Технология обработки призм при многономенклатурном, мелкосерийном производстве	86
Дьякова И.И., Лелянов А.Б., Бабин С.А., Бессмельцев В.П., Достовалов А.В. Технология нанесения сеток методом прожигания лазером, заполнения запуском, нанесения рисунка на металлическом покрытии и иследование повреждений стеклянной подложки	92
Гречишников В.А., Романов В.Б., Кузьменко А.А. Развертка с винтовым зубом на калибрующей части для обработки цилиндрических отверстий в оптических приборах	95
Якимова М.А, Григорьянц А.Г., Мельников Д.М., Алехнович В.И., Садков А.Б., Кретов Д.К. Оптический метод определения содержания белка в молоке по рассеянию света	98
Алехнович В.И., Григорьянц А.Г., Якимова М.А, Мельников Д.М., Баранов Д.А. Фотоакустическая гомогенизация молока с целью повыше- ния точности спектрального анализа	101

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАРОК СТЁКОЛ В ПРОГРАММЕ ZEMAX

#### МАЛЬКИН А.А.

OAO «Лыткаринский завод оптического стекла» E-mail: ogk45@lzos.ru

В работе представлена методика определения температурного и барического изменения показателей преломления марок бесцветного оптического стекла отечественного производства в программе ZEMAX.

Ключевые слова: термооптический анализ, термооптическая постоянная, показатель преломления.

В современных оптических системах для спецтехники, с высоким требованием к получаемому качеству изображения, немаловажную роль играет обеспечение сохранение качественных характеристик в экстремальных температурных условиях.

В программе ZEMAX вычисление относительных величин показателей преломления для различных температур и атмосферных давлений производится в следующей последовательности:

определяется величина относительного показателя преломления по одной из дисперсионных формул [1, 2];

вычисляется величина показателя преломления воздуха при стандартной температуре стекла [2,3] по формуле:

$$n_{air} = 1 + \frac{(n_{ref} - 1) \cdot P}{1 + (T - 15) \cdot (3,4785 \cdot 10^{-3})} \quad , \ (1)$$

где:

$$n_{ref} = 1 + \left[ 6432, 8 + \frac{2949810 \cdot \lambda^2}{146 \cdot \lambda^2 - 1} + \frac{25540 \cdot \lambda^2}{41 \cdot \lambda^2 - 1} \right] \cdot 10^{-8}$$

Т – температура (°С);

 P – относительная величина давления воздуха;

λ– расчётная длина волны (мкм).

Вычисляется величина абсолютного по-

казателя преломления стекла (относительно вакуума) при стандартной температуре стекла по формуле:

$$n_{abs}(\lambda, T_0) = n_{rel}(\lambda, T_0) \cdot n_{air}(\lambda, T, P). \quad (2)$$

Определяется изменение абсолютной величины показателя преломления стекла для заданной температуры:

$$\Delta n_{abs}(\lambda,T) = \frac{n^2(\lambda,T_0)-1}{2 \cdot n(\lambda,T_0)} \cdot D_0 \cdot \Delta T + D_1 \cdot \Delta T^2 + D_2 \cdot \Delta T^3 + \frac{E_0 \cdot \Delta T + E_1 \cdot \Delta T^2}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \bigg), (3)$$

где:

 $n(\lambda, T_0)$  – относительный показатель преломления для стандартной температуры стекла;

 $T_0$  – стандартная температура стекла (20°С);

 $\Delta T$  – отклонение температуры от стандартного значения (°С);

λ– расчётная длина волны (мкм);

 $D_{0}, D_{1}, D_{2}, E_{0}, E_{1}, \lambda_{TK}$  – полиноминальные коэффициенты.

По выражению (1) вычисляется показатель преломления воздуха при заданных значениях температуры и давления в оптической системе  $n_{air}(\lambda, T, P)$ . Определяется показатель преломления стекла относительно воздуха при заданной температуре и давлении воздуха в оптической системе:

$$n_{rel}(\lambda, T, P) = \frac{n_{abs}(\lambda, T_0) + \Delta n_{abs}(\lambda, T)}{n_{air}(\lambda, T, P)} \quad . \quad (4)$$

Таким образом, изменяя значение температуры окружающей среды T и давление P, согласно представленной выше методике, можно контролировать влияние  $\Delta n_{abs}(\lambda, T)$  на величину термооптических аберраций.

Каталоги и стандарты, включающие в себя марки отечественного бесцветного стекла [4, 5, 6, 7], содержат значения изменения абсолютного показателя преломления  $\beta_{abs}(\lambda, T)$ . Кроме того, значения  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  указаны только для видимой области спектрального диапазона: от линии F' (479.99нм) до линии С (656,27нм) (для некоторых марок стёкол значения  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  указаны только для трёх длин волн: F', е и C' (643,85нм), что делает невозможным анализ оптических систем в ближней УФ и ИК области спектра.

Согласно [7] коэффициент  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  для различных температур можно определить по формуле:

 $\beta_{abs}(\lambda,T) = \beta(\lambda,20^{\circ}C) + \Psi \cdot (T-20)$ , (5) где:

T – средняя температура интересующей области (°С);

 $\Psi$  – значение термооптической постоянной стекла  $\beta(\lambda, 20^{\circ}\text{C})$ .

Значения  $\beta(\lambda, 20^{\circ}\text{C})$  и  $\Psi$  для ряда стёкол приведены в каталоге [7].

Существенным недостатком использования выражения (5), при анализе влияния термоптических аберраций, является то, что значения  $\beta(\lambda, 20^{\circ}\text{C})$  и  $\Psi$  зависят от длины волны  $\lambda$ , и, соответственно, для каждой длины волны необходимы свои значения  $\beta(\lambda, 20^{\circ}\text{C})$  и  $\Psi$ .

С целью автоматизации процесса проектирования оптических систем, базирующихся на отечественной номенклатуре оптических материалов, в части расчёта термооптических аберраций, автором статьи предложена методика определения коэффициентов выражения (3). В [4] представлены значения  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  для шести длин волн и для двух температурных диапазонов, соответственно можно определить значения  $\beta(\lambda, 20^{\circ}C)$  и  $\Psi$  для имеющихся длин волн, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} \beta_{abs}(\lambda, T_1) = \beta(\lambda, 20^{\circ}C) + \Psi \cdot (T_1 - 20); \\ \beta_{abs}(\lambda, T_2) = \beta(\lambda, 20^{\circ}C) + \Psi \cdot (T_2 - 20), \end{cases}$$
(6)  
rge:

 $T_1$ =-20°С,  $T_2$ =70°С – средние значения температурных интервалов от минус 60 до плюс 20°С и от плюс 20 до плюс 120°С, соответственно. Указанная процедура служит для повышения эффективности аппроксимации по заранее определённым  $\beta_{abs}(\lambda,T)$  (за счёт избыточности исходных данных).

Известно, что

$$\beta_{abs}(\lambda,T) = \frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} \quad , \qquad (7)$$

или

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda,T_0)-1}{2\cdot n(\lambda,T_0)} \cdot \left(D_0 + 2\cdot D_1 \cdot \Delta T + 3\cdot D_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2\cdot E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2}\right), (8)$$

при  $\Delta T=0$ , выражение (8) примет вид:

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda,T_0)-1}{2 \cdot n(\lambda,T_0)} \cdot \left(D_0 + \frac{E_0}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2}\right) .$$
(9)

Преобразуя и приводя к линейному виду выражение (9), получаем:

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} \cdot K_{abs}(\lambda) \cdot \lambda^2 = F_0 + D_0 \cdot \lambda^2 + \frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} \cdot K_{abs}(\lambda) \cdot \lambda_{TK}^2 , \qquad (10)$$

где

$$K_{abs}(\lambda) = \frac{2 \cdot n(\lambda, T_0)}{n^2(\lambda, T_0) - 1}$$
,  $F_0 = E_0 - D_0 \cdot \lambda_{TK}^2$ .

На основе выражения (10) и значений  $\beta_{abs}(\lambda,T)$ , полученных при помощи выражений (6) и (7), составляется система уравнений с неизвестными:  $F_0$ ,  $D_0$ ,  $\lambda_{\rm TK}$ , которую удобнее всего решить линейным методом наименьших квадратов (МНК).

Значение коэффициента  $E_0$  определяется из выражения:

$$E_0 = F_0 + D_0 \cdot \lambda_{TK}^2 \ . \tag{11}$$

Подставив полученные коэффициенты:  $D_0$ ,  $E_0$ ,  $\lambda_{\rm TK}$  в выражение (8), получаем уравнение, линейное относительно коэффициентов:  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $E_1$ , которые можно определить с помощью решения системы линейных уравнений МНК.

В [7] указаны значения  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  не для всей номенклатуры отечественных марок оптического бесцветного стекла (не указаны для ЛК5, СТК8, ОК4, ЛФ7, Ф8, ОФ6 и др.). Данные для многих марок стёкол не указанных в [4] имеются в [7], но, к сожалению, значения  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  представлены только для трёх длин волн. В таком случае определение коэффициентов методом, изложенным выше, не имеет смысла, поскольку в процессе поиска значений коэффициентов формулы (8) появляются «мнимые» решения.

Для ограниченного перечня данных  $\beta_{abs}(\lambda, T)$  автором статьи была разработана упрощённая форма записи выражения (8), которая позволяет избежать «мнимых» решений [8]:

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda,T_0) - 1}{2 \cdot n(\lambda,T_0)} \cdot \left( D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta T + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2} \right) , (12)$$

Аппроксимируя выражение (12) линейным МНК можно определить значения коэффициентов:  $D_0, D_1, E_0, E_1$ .

На основе предложенной методики определения изменения значения отклонения абсолютного показателя преломления был проведён сравнительный анализ между данными, представленными в каталоге фирмы Шотт и данными, полученными путём расчёта по формуле (12) для тех же марок стёкол из каталога [7] (табл. 1– 4).

Из табл. 2–4 следует, что разница между данными из каталога фирмы Шотт и расчётными показателями несущественна. Кроме того, из табл. 2–4 видно, что результаты, полученные при помощи формулы (12), достаточно точно определяют величину отклонения абсолютного показателя преломления в зависимости от температуры в ближней УФ и ИК области спектра.

В рамках проделанной работы был проведён сравнительный анализ определения отклонения значений абсолютного показателя преломления в зависимости от температуры по формулам (7) – (11), данным [4] и выражению (12), результаты этого сравнения представлены в табл. 5.

Представленная в статье методика позволила включить в электронный каталог LZOS. AGF программы ZEMAX недостающие термооптические постоянные отечественных марок стёкол, выпускаемых на ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла (ОАО ЛЗОС).

	Коэффициенты формулы (8)									
Марка стекла	Базовые/	$D_0 \cdot 10^{-6}$	$D_1 \cdot 10^{-8}$	$D_2 \cdot 10^{-11}$	$E_0 \cdot 10^{-7}$	$E_1 \cdot 10^{-10}$	λτκ			
	расчётные	20, 10	<i>D</i> ], 10	$D_{2}, 10$	20, 10	21, 10	MIK			
BK7	Базовые	1,86	1,31	-1,37	4,34	6,27	0,17			
DK/	расчётные	0,953	1,3674	0	6,1489	7,5872	0			
BaK2	Базовые	-1,45	1,1	0,489	5,16	3,05	0,164			
Duitz	расчётные	-1,6924	1,2748	0	7,1567	9,1367	0			
SF6	Базовые	6,69	1,78	-3,36	0,177	0,17	0,269			
510	расчётные	4,2463	1,93	0	0,3288	0,1846	0			

Таблица 1.
Значения коэффициентов для марок стёкол фирмы ШОТТ, представленных в [7]
и полученных при помощи выражения (12)

#### Таблица 2.

Отклонения значения абсолютного показателя преломления для стекла марки ВК7 из каталога фирмы Шотт и рассчитанного по формуле (12) по данным каталога [7]

Лиапазон	$(\Delta n_{abs}/\Delta T) \cdot 10^{-6}$								
температур °С	g (435	,83нм)	e (546	,07нм)	1060нм				
reimiepuryp, e	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная			
-40/-20	1,2	1,1	0,8	0,6	0,3	0,3			
+20/+40	2,1	2,0	1,6	1,4	1,1	0,8			
+60/+80	2,7	2,6	2,1	2,0	1,5	1,3			

#### Таблица 3.

Отклонения значения абсолютного показателя преломления для стекла марки BaK2 из каталога фирмы Шотт и рассчитанного по формуле (12) по данным каталога [7]

Лиапазон	$(\Delta n_{abs}/\Delta T) \cdot 10^{-6}$								
температур °С	g (435	,83нм)	e (546	,07нм)	1060нм				
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная			
-40/-20	0,2	0,2	-0,3	-0,4	-0,9	-1,1			
+20/+40	0,9	1,1	0,3	0,5	-0,3	-0,3			
+60/+80	1,4	1,7	0,8	1,0	0,1	0,1			

#### Таблица 4.

## Отклонения значения абсолютного показателя преломления для стекла марки SF6 из каталога фирмы Шотт и рассчитанного по формуле (12) по данным каталога [7]

Лиапазон	$(\Delta n_{abs}/\Delta T) \cdot 10^{-6}$								
Temperatur °C	g (435	,83нм)	e (546	,07нм)	1060нм				
iomicpuryp, c	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная	Шотт	Расчётная			
-40/-20	11,9	12,2	7,4	8,0	3,7	3,1			
+20/+40	14,6	14,5	9,5	10,0	5,3	4,6			
+60/+80	16,1	16,0	10,6	11,2	6,1	5,6			

#### Таблица 5.

Отклонения значений абсолютного показателя преломления для стекла марки K8 из [4], рассчитанного с помощью выражений (7) – (12)

r	I									
Лиапазон	$(\Delta n_{abs}/\Delta T) \cdot 10^{-6}$									
температур	g (435	,83нм)	e (546	,07нм)	1060нм					
°C	Формулы	Выражение	Формулы	Выражение	Формулы	Выражение				
C	(7) – (11)	(12)	(7) - (11)	(12)	(7) - (11)	(12)				
-40/-20	1,1	1,0	0,4	0,4	-0,3	-0,3				
+20/+40	2,0	2,0	1,4	1,4	0,8	0,7				
+60/+80	2,8	2,7	2,1	2,1	1,4	1,3				

#### Список литературы:

1. *Zhang Shiyu*. Lens design using a minimum number of glasses/ Shiyu Zhang. - The University of Arizona, 1994. - p. 30.

2. ZEMAX Optical Design Program. User's Guide. Tucson, Arizona, USA: ZEMAX Development Corporation. 2009 - p. 499 - 501.

3. TIE-19: Temperature Coefficient of the Refractive Index/ SCHOTT Technical Information. 2008. - 12 p.

4. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. - М.: Издательство стандартов, 1994. - 27с.

5. РТМ 3-1830-89. Стекло оптическое

бесцветное. Физико-химические свойства. Справочные данные, 1989.

6. ОСТ3-77-77. Стекло оптическое бесцветное. Физико–химические свойства, 1978.

7. «Оптическое стекло». Каталог «Optisches Glas» М.: Машприборинторг; DDR Jena VEB Jener Glaswerk Schott & Gen, 1978.- 514с.

8. Малькин А.А. Определение температурного изменения показателя преломления отечественных марок стёкол в современных САПР по расчёту оптических систем/А.А. Малькин – М.: Сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, ОАО «НПО «Орион», 2014. - с. 137-141.

## РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЕРХОБЛЕГЧЕННЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

#### АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ВЛАДИМИРОВ Н.М., ДОБРИКОВ Н.С., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П.

#### ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

#### E-mail: lastro@lzos.ru

Основными этапами выбора и оптимизации конструкции сверхоблегченных зеркал являются подбор материала и определение типа и параметров ячеек структуры облегчения. Оптимизация конструкции зеркал, основанная на расчете методом конечных элементов, позволяет определить оптимальные параметры ячеек структуры облегчения с целью получения максимальной жесткости конструкции при ее минимальной массе. Варьируемыми параметрами являются толщина рабочей поверхности, размер и форма ячеек структуры облегчения и толщина ребер.

**Ключевые слова:** облегченное зеркало, сплошное зеркало, жесткость зеркала, толщина рабочей поверхности, толщина ребер, размер ячеек.

Степень жесткости  $K_W$  облегченного зеркала оценивается сравнением прогибов облегченного  $W_{ob}$  и сплошного  $W_{cn}$  зеркал под действием собственного веса [1, 2]:

$$K_W = \frac{W_{o\delta}}{W_{cn}}$$

чем меньше  $K_{W^2}$  тем большую жесткость имеет зеркало.

Степень облегчения  $K_{M}$  оценивается отношением масс облегченного  $M_{o\delta}$  и сплошного  $M_{cn}$  зеркал:

$$K_{M} = \frac{M_{ob}}{M_{cn}}$$

С учетом введенных количественных критериев могут быть сформулированы требования к облегченным зеркалам:

- облегченное зеркало, при равенстве размеров рабочей поверхности со сплошным и одинаковой строительной высотой при минимальной массе имело максимальную жесткость, т.е.  $K_{M}$  → min и  $K_{W}$  → min;

- материал и конструкция облегченного зеркала должны обеспечивать обработку и контроль рабочих поверхностей с заданной точностью традиционными технологическими приемами и оборудованием;

конструкция облегченного зеркала долж на обеспечивать крепление и разгрузку без
существенного усложнения оправ и разгру зочных устройств, а также без возрастания
массы узла в целом;

- материал и конструкция облегченного зеркала должны обеспечивать однородность тепловых и механических свойств зеркала, сохранность рабочей формы поверхности в эксплуатации.

Для отработки методики расчета и анализа влияния геометрических параметров зеркал на коэффициент жесткости и коэффициент облегчения использовалась программа ANSYS [3, 4], был написан макрос ANSYS mechanical APDL, позволяющий в автоматическом режиме изменять геометрические параметры зеркала и производить расчет деформаций рабочей поверхности и веса зеркала.

На рис. 1 показаны основные параметры структуры облегчения: толщина зеркала по краю (H), толщина рабочей поверхности (t), размер (B) и форма ячеек, толщина ребер (d).



Рисунок 1. Параметры структуры облегчения

Анализ проводился на базе зеркала со следующими основными параметрами:

1) Габаритные размеры зеркала:

D = 1900 мм - диаметр зеркала;

*Dome*. = 300 мм - диаметр отверстия;

D/f' = 1/2 - относительное отверстие;

*H* = 300 мм - толщина зеркала по краю (строительная высота);

Форма ячеек структуры облегчения – шестиугольная (рис. 2).

2) Физико-механические свойства материала (ситалл CO115-M):

 $E = 9,2 \times 10^{10}$  Па - модуль упругости Юнга;

v = 0,28 - коэффициент Пуассона;

 $\rho = 2460 \text{ кг/м}^3 - плотность.}$ 

#### ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА *K<sub>w</sub>* И *K<sub>m</sub>*

При изменении толщины рабочей поверхности и сохранении всех остальных геометрических параметров неизменными получим следующие графики зависимости коэффициента жесткости  $K_w$  (рис. 3) и коэффициента облегчения (1- $K_M$ ) от толщины рабочей поверхности *B* (рис. 4). Из графиков видно, что коэффициент облегчения изменяется полинейному закону, а на графике для коэффициента жесткости существует точка перегиба, в которой толщина рабочей поверхности будет оптимальной. Для данного примера это t=12 мм.



Рисунок 3. Зависимость коэффициента жесткости от толщины рабочей поверхности

Рисунок 2. Облегченное зеркало



Рисунок 4. Зависимость коэффициента облегчения от толщины рабочей поверхности







Рисунок 6. Зависимость коэффициента облегчения от толщины ребер



Рисунок 7. Зависимость коэффициента жесткости от размера ячейки

#### ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ НА *K<sub>w</sub>* И *K<sub>m</sub>*

При изменении толщины ребер и сохранении всех остальных геометрических параметров неизменными получим следующие графики зависимости коэффициента жесткости (рис. 5) и коэффициента облегчения от толщины ребер (рис. 6).

Из рис. 5 видно, что и для толщины ребер можно подобрать оптимальную величину с минимальным коэффициентом жесткости. Для данного примера это *d*=6 мм.

#### ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЯЧЕЕК СТРУКТУРЫ ОБЛЕГЧЕНИЯ НА *K<sub>w</sub>* И *K<sub>m</sub>*

Графики зависимости коэффициента жесткости и коэффициента облегчения от размера ячеек представлены на рис. 7 и рис. 8. Из графиков можно сделать следующие выводы: - зависимость коэффициента облегчения от размера ячеек линейная;

- зависимость коэффициента жесткости от размера ячеек имеет сложную форму с явно выраженными экстремумами, в локальных минимумах соотношение коэффициентов жесткости и облегчения будет оптимальным.

#### СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ОБЛЕГЧЕНИЯ НА *К*<sub>W</sub>

На рис. 9 и рис. 10 представлены графики зависимости коэффициента жесткости от размера ячейки при различных толщинах рабочей поверхности и ребер. Из графиков можно сделать следующие выводы:

- При изменении толщины рабочей поверхности экстремумы остаются неизменными, их положение зависит только от размера ячейки, при этом для каждого размера *В* можно подобрать такую толщину поверхности, при которой жесткость зеркала будет максимальной.

- При изменении толщины ребер изменяется характер кривой и положение экстремумов.

В связи с вышеизложенным целесообразно сначала оптимизировать толщину ребер и размер ячейки, а затем толщину рабочей поверхности.

Размер	Толщина ребра, мм											
ячейки,		3			4			5			6	
ММ	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	لح	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	ځ	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	ξ	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	ξ
76	1,432	86,43	1,807	1,469	84,07	1,759	1,481	81,75	1,724	1,493	79,46	1,690
77	1,437	86,49	1,805	1,473	84,16	1,758	1,484	81,86	1,725	1,498	79,59	1,690
78	1,437	86,53	1,806	1,475	84,21	1,758	1,485	81,99	1,726	1,497	79,67	1,691
79	1,437	86,65	1,807	1,475	84,37	1,760	1,486	82,12	1,727	1,496	79,89	1,694
80	1,425	86,75	1,815	1,460	84,51	1,769	1,470	82,32	1,737	1,481	80,11	1,704
81	1,435	86,90	1,812	1,466	84,69	1,768	1,473	82,52	1,738	1,485	80,37	1,705
82	1,455	86,95	1,802	1,472	84,78	1,767	1,481	82,63	1,735	1,493	80,50	1,703
83	1,445	87,00	1,808	1,469	84,82	1,769	1,476	82,68	1,739	1,486	80,59	1,708
84	1,461	87,05	1,801	1,479	84,90	1,765	1,483	82,77	1,736	1,491	80,67	1,706
85	1,467	87,10	1,798	1,476	85,03	1,768	1,481	82,86	1,738	1,489	80,78	1,709
86	1,467	87,25	1,800	1,470	85,16	1,772	1,473	83,10	1,745	1,484	81,06	1,715
87	1,472	87,34	1,798	1,468	85,29	1,775	1,468	83,25	1,746	1,472	81,25	1,722
88	1,485	87,41	1,793	1,445	85,36	1,787	1,482	83,35	1,744	1,485	81,36	1,718
89	1,506	87,48	1,784	1,471	85,44	1,775	1,492	83,46	1,741	1,502	81,49	1,712
90	1,515	87,52	1,781	1,498	85,51	1,763	1,502	83,54	1,737	1,506	81,58	1,710
91	1,532	87,56	1,773	1,506	85,58	1,760	1,513	83,61	1,733	1,518	81,67	1,706
92	1,543	87,61	1,769	1,519	85,64	1,756	1,524	83,69	1,729	1,529	81,76	1,702
93	1,525	87,66	1,778	1,507	85,71	1,762	1,512	83,77	1,735	1,519	81,87	1,709
94	1,519	87,83	1,783	1,504	85,87	1,765	1,506	84,05	1,742	1,516	82,19	1,714
95	1,523	87,90	1,782	1,502	86,03	1,768	1,506	84,17	1,743	1,515	82,33	1,716
96	1,535	87,94	1,777	1,512	86,07	1,764	1,514	84,22	1,740	1,523	82,39	1,713
97	1,536	87,96	1,777	1,514	86,09	1,763	1,517	84,25	1,739	1,522	82,43	1,714
98	1,549	88,03	1,772	1,525	86,19	1,760	1,527	84,37	1,736	1,564	82,57	1,697
99	1,613	88,11	1,746	1,610	86,32	1,725	1,608	84,50	1,703	1,607	82,70	1,681
100	1,576	88,18	1,762	1,564	86,36	1,745	1,583	84,57	1,714	1,572	82,78	1,696
101	1,566	88,22	1,767	1,544	86,42	1,754	1,558	84,64	1,726	1,559	82,88	1,703
102	1,544	88,26	1,777	1,531	86,48	1,760	1,534	84,71	1,737	1,539	82,97	1,713
103	1,539	88,32	1,780	1,516	86,56	1,768	1,525	84,85	1,743	1,519	83,10	1,724
104	1,534	88,41	1,783	1,522	86,64	1,767	1,517	84,99	1,748	1,521	83,30	1,725
105	1,547	88,47	1,778	1,528	86,70	1,765	1,525	85,09	1,746	1,530	83,42	1,723
106	1,555	88,47	1,775	1,534	86,77	1,763	1,530	85,09	1,743	1,533	83,42	1,722
107	1,572	88,46	1,767	1,543	86,76	1,759	1,533	85,08	1,742	1,531	83,44	1,723
108	1,574	88,48	1,767	1,550	86,81	1,756	1,529	85,11	1,744	1,529	83,45	1,724
109	1,588	88,54	1,762	1,557	86,87	1,754	1,545	85,21	1,738	1,537	83,57	1,722
110	1,600	88,55	1,757	1,568	86,88	1,749	1,556	85,22	1,734	1,554	83,59	1,715
111	1,600	88,61	1,758	1,564	86,96	1,752	1,550	85,33	1,738	1,549	83,71	1,718
112	1,612	88,65	1,753	1,565	87,02	1,753	1,550	85,41	1,739	1,547	83,81	1,720
113	1,604	88,73	1,757	1,553	87,13	1,759	1,540	85,54	1,745	1,539	83,96	1,726
114	1,603	88,78	1,759	1,551	87,20	1,761	1,534	85,62	1,748	1,540	84,05	1,726
115	1,610	88,84	1,756	1,550	87,25	1,762	1,535	85,71	1,749	1,541	84,14	1,726
116	1,620	88,87	1,753	1,548	87,31	1,763	1,541	85,76	1,747	1,542	84,23	1,727
117	1,625	88,93	1,751	1,568	87,41	1,756	1,555	85,88	1,742	1,550	84,33	1,725
118	1,630	88,98	1,750	1,573	87,51	1,755	1,563	85,94	1,740	1,559	84,43	1,723
119	1,640	88,99	1,746	1,583	87,62	1,752	1,571	85,94	1,736	1,566	84,44	1,720
120	1,653	88,99	1,741	1,596	87,72	1,748	1,577	85,95	1,734	1,572	84,52	1,718

#### Таблица 1. Подбор параметров ячеек

#### Таблица 2.

Оптимальные параметры структуры облегчения

Т	Deercom		Толщина рабочей поверхности t, мм				
голщина ребра d	газмер ячейки	10			11		12
реори и, ММ	В, мм	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%	K <sub>W</sub>	1-K <sub>M</sub> ,%
3	80	1,425	86,755	1,435	86,421	1,447	86,087
4	88	1,445	85,364	1,449	85,034	1,455	84,704
5	115	1,535	85,711	1,538	85,381	1,543	85,051
6	116	1,542	84,230	1,539	83,906	1,540	83,581



Рисунок 8. Зависимость коэффициента облегчения от размера ячейки



гисунок э. Зависимость коэффициента жесткости от размера ячейки при различных толщинах рабочей поверхности



Рисунок 10. Зависимость коэффициента жесткости от размера ячейки при различных толщинах ребер

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИНЫ РЕБРА И РАЗМЕРА ЯЧЕЙКИ

Был проведен расчет коэффициентов жесткости и облегчения для различных толщин ребер и размеров ячейки. Результаты приведены в таблице 1.

Так как для реальных конструкций зеркал снижение коэффициента жесткости не менее важно, чем повышение коэффициента облегчения введем коэффициент ξ, учитывающий суммарное влияние этих двух коэффициентов:

$$\boldsymbol{\xi} = \frac{K_{W\min}}{K_{W}} \cdot \frac{\left(1 - \frac{1 - K_{M\max}}{1 - K_{M\min}}\right)}{\left(1 - \frac{K_{W\min}}{K_{W\max}}\right)} + \frac{1 - K_{M}}{1 - K_{M\max}},$$

где

 $K_{Wmin}$  – минимальный коэффициент жесткости,

 $K_{_{Wmax}}$  – максимальный коэффициент жест-кости,

*К*<sub>*wi*</sub> – текущий коэффициент жесткости,

1-*К*<sub>*мтіп</sub> – минимальный коэффициент облегчения*,</sub>

1-*K*<sub>*Mmax*</sub> – максимальный коэффициент облегчения,

1-К<sub>мі</sub> – текущий коэффициент облегчения.

Полученные максимальные значения коэффициента  $\xi$  для каждой величины толщины ребер жесткости выделены в табл. 1. После чего произведен подбор толщины рабочей поверхности (табл. 2).

Таким образом, произведена оптимизация параметров структуры облегчения для шестиугольных ячеек. Аналогичным образом выполняется расчет и для структуры другой формы (треугольной, круглой и т.д.).

Расчеты показали, что максимальная жесткость и степень облегчения достигается при минимальной толщине ребер жесткости. Однако существует фактор риска получения бракованной заготовки из-за несовершенства обрабатывающего оборудования и инструмента, а также неоднородности материала. Поэтому выбор значения толщины ребер следует осуществлять исходя из технологических возможностей предприятия-изготовителя.

#### Список литературы

1. «Проектирование крупногабаритных высокоточных облегченных зеркал» Аналитический обзор под редакцией С.А.Архипова. НТЦ «ИН-ФОРМТЕХНИКА». 2004 г.

2. Маламед Е.Р., Петров Ю.Н., Соколов И.М. Конструкции главных зеркал космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 26–30.

3. *Сегерлинд Л*. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.

4. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах/ Под общей редакцией Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.

#### РАЗРАБОТКА НИЗКОУРОВНЕВЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОБЪЕКТАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ДРОБОТ А.С., АБРАМЕШИН В.В., ДАВИДЕНКО В.П., КОДИНЦЕВА Е.В.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: ogk45@lzos.ru

В статье рассматривается разработка низкоуровневых телевизионных камер с черно-белым изображением для объектов специального назначения, их использование в обзорных комплексах, компоновка изготавливаемых и разрабатываемых телевизионных камер, систем наблюдения на их основе и перспективные направления развития телевизионных приборов наблюдения.

Ключевые слова: ПЗС матрица, низкоуровневая телевизионная камера.

Начиная с 2003 года предприятием ОАО «ЛЗОС» ведется разработка и изготовление низкоуровневых черно-белых телевизионных камер, используемых на объектах специальной техники. Телевизионные камеры типа ТВКТ (рис. 1) разрабатывались на основе модуля с ч/б ПЗС матрицей 1/3′′ ICH259AL.

Позднее (2009 г.) матрица была заменена на черно-белую матрицу 1/3<sup>''</sup> ICX659ALA, с целью повышения чувствительности телекамер. Линейка телекамер типа ТВКТ выполнена в одних габаритно-посадочных размерах и включает в себя камеры с углами обзора в



Рисунок 1. Телевизионная камера типа ТВКТ

горизонтальной плоскости 33°, 43° 65°, 80°, 95°. Диапазон рабочих освещенностей составляет от 0,01 до 30000 лк.

Телекамеры типа ТВКТ обеспечивают возможность применения как в виде одиночного прибора наблюдения так и применение в системе видеонаблюдения показанной на рис. 2.

Позднее перед ОАО «ЛЗОС» была поставлена задача разработки низкоуровневых черно-белых телевизионных камер для использования в составе оптико-электронных систем наблюдения на стационарных и подвижных комплексах. За основу были взяты уже опробованные модули на основе чернобелых ПЗС матриц 1,3'' ICX659ALA, доработанные в части введения возможности внешней синхронизации кадровым синхроимпульсом. Линейка состоит из камер (рис. 3) с углами обзора в горизонтальной плоскости 3°, 9°, 20°.

Оба типа телевизионных камер прошли все необходимые испытания, как автономные, так и в составе объектов спецтехники, в результате были подтверждены технические и качественные характеристики.

В 2011 году перед специалистами ОАО «ЛЗОС» была поставлена задача разработки камеры с черно-белым изображением, углом обзора 68±2°, работающей в широком

13



Рисунок 2. Система видеонаблюдения

диапазоне освещенностей от 0,01 до 100 000 лк.

Камера разрабатывалась на базе модулей с черно-белой ПЗС матрицей 1/2′′ ICX429ALL. Результатом разработки стала обзорная камера ОК-68H (рис. 4).

Технические характеристики изделия были подтверждены результатами автономных испытаний. В данный момент проводятся испытания в составе объектов спецтехники. В настоящее время, в области разработки телевизионных приборов наблюдения, перед ОАО ЛЗОС ставятся следующие задачи:

 разработка телевизионных приборов наблюдения, включающих несколько каналов изображения и объединенных в один корпус (рис. 5), в которых применяются зеркала или призмы (рис. 6).

Данные системы позволяют увеличить





Рисунок 3. Телевизионные камеры ТВКТ-3Н и ТВКТ-9Н

Рисунок 4. Обзорная камера ОК-68Н



Рисунок 5. Трехканальный призменный телевизионный прибор



Рисунок 6. Схема телевизионного прибора с призменным каналом

дальность наблюдения и углы обзора, а также улучшить массогабаритные характеристики;

 разработка цветных телевизионных камер для объектов спецтехники;

- разработка телевизионных камер с цифровым выходом для изделий спецтехники;

- разработка миниатюрных телевизионных камер для изделий спецтехники.

В разработках учтен более чем десятилетний опыт в области низкоуровневых чернобелых телевизионных камер, а также перспективные направления развития телевизионных приборов наблюдения.

#### ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ: МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

#### ПОЛЕЩУК А.Г., КОРОЛЬКОВ В.П., НАСЫРОВ Р.К.

#### Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

#### E-mail: poleshchuk@iae.nsk.su

Рассмотрены методы изготовления прецизионных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с использованием круговой лазерной записывающей системы типа CLWS-300IAE. Праведен обзор и классификация ДОЭ для оптического контроля. Представлены результаты разработки и применения в ИАиЭ СО РАН различных типов ДОЭ для интерферометрического контроля асферических поверхностей.

Рассмотрены принципы формирования и одновременного контроля с нанометровой точностью эталонных асферических волновых фронтов для решения задачи создания метрологических эталонов асферических волновых фронтов и асферических поверхностей

Ключевые слова: синтезированная голограмма, дифракционный оптический элемент, асферический волновой фронт, интерферометр.

Дифракционный оптический элемент (ДОЭ) рассчитывается с помощью компьютера и изготавливается с использованием оптических, механических или электроннолучевых устройств записи. Такой элемент позволяет преобразовывать исходный волновой фронт в любой другой волновой фронты с практически любой заданной формой. Это одно из основных свойств ДОЭ, отмеченное еще в первых работах по цифровой голографии [1] и сразу нашедшее практическое применение в оптической метрологии для интерферометрического контроля формы асферических поверхностей [2].

Создание современных оптических систем уже невозможно без использования асферических линз, то есть оптических компонентов, форма поверхности которых отличается от сферической. Применение асферики обеспечивает существенное уменьшение массы и габаритов оптических приборов, улучшение качества изображения, светосилы и угла поля зрения. Однако изготовление асферической оптики невозможно без эффективных и доступных методов контроля изготавливаемых асферических поверхностей. Требуемую точность изготовления и аттестации оптики в условиях производства (вибрации, потоки воздуха) можно реализовать, используя современные лазерные интерферометры «фазового сдвига», дифракционные интерферометры с совмещёнными ветвями и общим ходом интерферирующих пучков, прецизионные ДОЭ и методы математической обработки результатов измерений.

В настоящей работе рассмотрены методы изготовления мульти-функциональных прецизионных ДОЭ с использованием круговой лазерной записывающей системы (ЛЗС) типа CLWS-300IAE [3]. Дается обзор и классификация ДОЭ для оптического контроля и представляются результаты разработки и применения в ИАиЭ СО РАН различных интерферометров.

Наиболее широко известны два типа интерферометров: Физо и Тваймана-Грина (рис. 1а, б), которые выпускаются серийно. Каждый из них обладает рядом преимуществ и недостатков. Отметим, что схема Физо имеет общий ход лучей, что существенно упрощает конструкцию и увеличивает точность измерений, а схема Тваймана-Грина позволяет получить в ряде случаев более высокий контраст интерферограммы за счет введения фильтра (Ф) в опорный пучок.

Классический метод контроля асферической поверхности основан на использовании многоэлементных рефракционных (или



Интерферометры Физо (а), Тваймана-Грина (б) и типичная схема контроля асферической поверхности (в).

ЭП – эталонная пластина; СД – светоделитель; ПФ – пространственный фильтр; Ф – фильтр (аттенюатор); КП – контролируемая поверхность

зеркальных) корректоров («null lens» в иностранной литературе), которые преобразует плоский (или сферический) волновой фронт W<sub>1</sub> на выходе измерительной ветви интерферометра в асферический W<sub>2</sub>, согласованный с формой контролируемой поверхности [4]. Интерферометр осуществляет сравнение (компарирование) этого волнового фронта и исследуемой поверхности. Таким образом, если поверхность имеет заданную форму, то выходной сигнал интерферометра будет равен нулю («бесконечная полоса»). Однако, к сожалению, всегда может возникнуть ситуация, когда корректор рассчитан или изготовлен с ошибкой. В этом случае форма поверхности будет искажена. Классический пример  – зеркало космического телескопа Хаббла [5], ошибка в форме которого, из-за неправильно собранного корректора, была обнаружена на орбите, а не в оптической мастерской.

Применение ДОЭ позволяет решить проблему контроля асферики. Возможны несколько основных вариантов применений ДОЭ:

1. ДОЭ выполняет роль имитатора контролируемой поверхности [6, 7] и с ее помощью проверяется классический линзовый корректор (т.е. проблема с телескопом Хаббл больше не повторится).

2. ДОЭ выполняет роль корректора, преобразуя волновой фронт интерферометра в асферический [8].

3. ДОЭ обеспечивает точную юстировку



Рисунок 2.

#### Основные оптические схемы для контроля асферики:

контроль 3-х линзового корректора зеркала телескопа Магеллан (Ø 6.5-т f/1.25) (а), контроль асферической поверхности с помощью объектива Физо и ДОЭ (б), ход пучков света в юстировочных ДОЭ (в), контроль асферической поверхности с помощью ДОЭ Физо (аналог пробного стекла) (г) и внешний вид типичной ДОЭ, изготовленной в ИАиЭ СО РАН (д)



Рисунок 3.

Структура центральных областей осевой и внеосевой ДОЭ и их пространственные спектры (a, б), типичная интерферограмма полученная с использованием осевой ДОЭ (в) и схемы контроля асферики с внеосевыми ДОЭ (в, г)

всей оптической измерительной схемы (интерферометр – дифракционный корректор – контролируемая поверхность) [9].

Для контроля асферики применяются как осевые, так и внеосевые ДОЭ. Осевые ДОЭ применяются, в основном, для контроля осесимметричной оптики. Они проще в расчете, юстировке и могут быть изготовлены с высокой точностью с помощью устройств прямой лазерной записи с круговым сканированием [3] или методами алмазного точения [10]. На рис.2 приведены оптические схемы на основе осевых ДОЭ, для контроля асферики. Также как и в классическом варианте (рис. 1в), ДОЭ – дифракционный компенсатор (рис. 2б), рассчитывается таким образом, что все лучи падают на КП под прямыми углами. При этом ДОЭ используется дважды в одном и том же дифракционном порядке. При контроле стеклянных поверхностей (коэф. отражения ~5%) ДОЭ должна быть, как правило, фазовой (бинарной), а при контроле высокоотражающих (Ge, Si, Al, Cu) - может быть и амплитудной (хромовая структура на оптической подложке).

Однако дифракционные порядки осевых ДОЭ в плоскости пространственного фильтра (ПФ, на рис.1) перекрываются (рис. 3 а), их невозможно полностью отфильтровать, а это часто приводит к появлению яркого пятна в центре интерферограммы (рис. 3в). Этого недостатка лишена схема с внеосевой ДОЭ и изломом оптической оси [11] (рис. 3в), которая часто применяются для контроля цилиндрической оптики. В этой схеме, опорный волновой фронт формируется при отражении от ЭП, а измерительный дважды проходит установленную под углом α к оптической оси ДОЭ, отражаясь от КП. Если оптической силы одной внеосевой ДОЭ недостаточно, то применяют более сложные гибридные схемы [12].

Одним из основных вопросов при использовании ДОЭ является достижимая точность измерений. Специфическими источниками погрешностей ДОЭ являются: ошибки в формировании дифракционной структуры ДОЭ, искажения вносимые подложкой и погрешность юстировки. Локальная ошибка дифракционной структуры ДОЭ δ приводит к появлению погрешности измерительного волнового фронта [13]  $W_2 = -m\lambda \, \delta/T$ , где T локальный период зон, *m* – порядок дифракции и λ- длина волны. В первые годы развития дифракционной оптики этот тип ошибок был определяющий и сдерживал широкое применение ДОЭ для высокоточного контроля асферики. В последние годы в ИАиЭ СО РАН была разработана новая технология изготовления ДОЭ, позволяющаяе минимизировать этот тип ошибок (рис. 4). Прецизионные ДОЭ изготавливаются индивидуально, методом прямой лазерной термохимической записи по пленкам хрома, нанесенным на высококачественные кварцевые пластины [3] с последующим реактивым-ионным травлением. В современных ЛЗС  $\delta < 50$ нм, что соответствует погрешности измерительного волнового фронта (для амплитудных ДОЭ с апертурой NA=0.5) W, ~  $\lambda$ /30 (P-V). При меньших апертурах этот источник погрешностей становится незначительным. T.e. качество подложки, равномерность ионного травления и точность юстировки становятся определяющими факторами. Разработка комбинированных ДОЭ [14], которые могут формировать несколько независимых волновых фронтов, позволили создать в ИАиЭ СО РАН интерферометр (рис. 3г), в котором искажения вносимые подложкой компенсируются. Было экспериментально показано, что даже если искажения вносимые подложкой достигают (1-2) λ, точность контроля может быть не хуже 0.06 λ (Р-V).

Таким образом, современное развитие технологии дифракционной оптики уже позволяет успешно решать многие задачи прецизионного нанометрического контроля широкого класса асферических поверхностей в условиях оптического производства. Дальнейшие наши исследования будут сосредоточены на методах повышения точности измерения за счет устранения специфических погрешностей ДОЭ и влияния внешних дестабилизирующих факторов.

Данная работа была выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта № 112 Сибирского отделения РАН, программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проекта 24-8 и проекта РФФИ 12-02-01118.

#### Список литературы:

1. *A.W. Lohmann, S.P. Paris.* Binary Fraunhofer holograms generated by computer// Apl. Opt. 6. N10, pp. 1739-1748. (1967).



2. Г.Н. Буйнов, Н.П. Ларионов, К.С. Мустафин. Голографический интерферометрический контроль асферических поверхностей//Оптико-механическая промышленность. 1971, №4, с.6-11.

3. A.G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, etc. "Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure," Appl. Opt. 38, 1295–1301 (1999).

4. Д. Малакара. Оптический производственный контроль. М. Машиностроение. 1985.

5. *L. Allen, J. Angel, J. Mongus etc.* The Hubble Space Telescope optical system failure report// NASA report (NASA Washington D.C., November 1990).

6. *Н.П.Ларионов, А.В.Лукин, Р.А.Рафиков.* Имитатор главного зеркала телескопа на основе синтезированной голограммы//ОМП, 1980, №1,с.39-40.

7. J.H.Burge, V.V.Cherkashin, V. P.Koronkevich, A. G.Poleshchuk. Measurement of 6.5 and 8.4-meters aspherical mirrors shape by computer generated holograms. VI Международная конференция "Прикладная оптика" (октябрь 2004 г., Санкт-Петербург), т. III, с. 203-207.

8. J. C. Wyant. and V. P. Bennett. «Using computer-generated holograms to test aspheric wavefronts,» Appl. Opt. 11, 2833-2839 (1972).

9. *А.Г.Полещук*. Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах // Автометрия, 1985. № 6. С.27-31.

10. L. Lei, Y. Allen, H. Chunning etc. Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process// Opt. Eng. 45, Issue 11, 113401 (2006).

11. S. M. Arnold, L. C. Maxey, J. E. Rogers, R. C. Yoder. "Figure metrology of deep aspherics using a conventional interferometer with CGH null," Proc. SPIE 2536, 106–116 (1996).

12. F. Pan, J.Burge, D. Anderson, A. Poleshchuk. Efficient Testing of Segmented Aspherical Mirrors by Use of a Reference Plate and Computer-Generated Holograms. II. Case Study, Error Analysis, and Experimental Validation// Appl. Opt., **43**, Issue 28, P. 5313-5322 (2004).

13. А.Г.Полещук, В.П.Коронкевич, В.П.Корольков, А.А.Харисов, В.В.Черкашин. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и измерения // Автометрия. 1997. N 6. C. 42.

14. *J.-M. Asfour*, *A.G. Poleshchuk*. Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram, *JOSA A*, 23, Issue 1, pp.172-178, (2006).

#### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ БТТ НА ПРИМЕРЕ РАЗРАБОТОК ОАО «ШВАБЕ - ПРИБОРЫ» И ОАО «ШВАБЕ – ОБОРОНА И ЗАЩИТА»

#### КОРОНИН Ю.Н., КАСАТКИН И.В.

ОАО «Швабе – Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

В статье представлен краткий исторический обзор эволюции основных конструктивных решений ОАО «Швабе – Приборы» и ОАО «Швабе – Оборона и Защита» в области построения тепловизионных каналов для объектов БТТ. Приведены материалы об использовании и постепенном внедрении новых типов схем сканирования, а также перспективных фотоприемных устройств.

**Ключевые слова:** фотоприемное устройство, поле зрения, тепловизионный канал, сканирование, обнаружение/распознавание.

#### введение

В настоящее время тепловизионные каналы и приборы на их основе активно используются на объектах БТТ большинства стран мира. Стремительное развитие технологии последних лет значительно расширило номенклатуру предлагаемой элементной базы данного типа приборов и, как следствие, сделало возможным широкую вариативность предлагаемых разработчиками схемотехнических решений. В этих условиях становится интересным проследить эволюцию технических принципов построения тепловизионных каналов для объектов БТТ, начиная с середины XX века на примере разработок ОАО «Швабе - Приборы» и ОАО «Швабе - Оборона и Защита».

#### ПРИБОР 1ПН59

Первые попытки внедрить на Новосибирском приборостроительном заводе (ныне ОАО «Швабе – Оборона и Защита») работы по тепловизионной тематике были предприняты головным институтом НИИПФ (г. Москва) в рамках НИР «Вечер» и НИР «Вечер-2» в 1967...1969 гг. Тогда это был прибор с одноэлементным приёмником и с усилителями на пальчиковых лампах.

Работы по тепловизионной тематике в «ЦКБ «Точприбор» (ныне ОАО «Швабе -Приборы») были начаты в 1975 году при выполнении НИР «Лена» по исследованию возможности создания тепловизионного наблюдательного прибора на отечественном фотоприемном устройстве. Экспериментальный образец изделия в течение двух лет испытывался на заволских стенлах и полигоне. Испытания подтвердили правильность заложенных в образец инженерных решений. По результатам этой работы была поставлена ОКР «Пособие» по созданию первого в СССР тепловизионного наблюдательного прибора разведки 1ПН59 на базе ФПУ «Лена ФН» для подвижного разведывательного пункта (ПРП).

Прибор состоит из приёмного устройства 1 (рис. 1), блока управления 2, блока коммутации 3 и двух блоков индикации. Картина местности проецируется на фоторезистор ФПУ двухлинзовым объективом в режиме обнаружения (угловое поле  $3,3^{\circ} \times 4,3^{\circ}$ ) или зеркальным объективом в режиме распознавания (угловое поле 1,0°×1,3°). Переключение режимов работы обеспечивается поворотом сканирующего зеркала на 90°. Фоторезистор ФПУ имеет 50 чувствительных элементов размером 100×100 мкм, расположенных в один ряд с шагом 130 мкм. Линейка ФПУ обеспечивает размер поля зрения по горизонту. Поле зрения по вертикали обеспечивается механическим сканированием поля зрения по фотоприёмнику с помощью колебания плоского зеркала по синусоидальному закону. На одной оси с колеблющимся зеркалом расположен датчик кадровой развертки, повторяющий закон колебания сканирующего зеркала и вырабатывающий сигнал нулевого положения, соответствующий нулевой линии визирования прибора.

Оптическая схема прибора 1ПН59 (рис. 2) представляет собой два вложенных друг в друга объектива узкого (1, 2, 3, 4, 5) и широ-кого (1, 6, 7, 3, 4, 5) полей зрения.

Деталь 2 - параболоид. Оптическая схема изделия была рассчитана для работы с фотоприёмником «Лена-ФН» в спектральном диапазоне 3..5 мкм.

Особенностью тепловизионных приборов первого поколения является необходимость охлаждения чувствительных элементов фотоприемников до низких температур 79 К. Поэтому в составе изделия 1ПН59 имеется система охлаждения, состоящая из компрессора, фильтра, трубопроводов, соединяющих компрессор с микротеплообменником входящим в состав фотоприёмника. В микротеплообменнике газовая смесь (на базе азота), поступающая под высоким давлением, дросселируется, охлаждая фотоприёмник, затем возвращается под низким давлением в компрессор.

В приёмном устройстве расположена вся оптико-механическая часть изделия: два объектива - линзовый широкопольный и зеркальный узкопольный; механизмы: сканирования, смены полей зрения, фокусировки; основной электронный тракт: 50 усилителей сигналов; коммутатор опроса чувствительных элементов; источники питания; фотоприёмник с микротеплообменником. Приёмное устройство закреплено на подшипнике и может поворачиваться по вертикали в пределах от минус 6° до 16° от маховичка. Компрессор системы охлаждения был установлен неподвижно на сварном кронштейне и соединён с приемным устройством трубопроводами.

Блок управления вырабатывает сигналы управления, синхронизации, «марки» и обеспечивает выверку по горизонту. Блок коммутации предназначен для включения изделия, контроля времени наработки и защиты от перегрузок по току. Блок индикации служит для индикации картины наблюдаемого пространства на экране кинескопа.

Испытания, доработка конструкции и электрических схем, отработка технологии из-







Тепловизионный прибор разведки 1ПН59: а) внешний вид; б) изображение на экране монитора; 1 - приёмное устройство; 2 - блок управления; 3 - блок коммутации; 4 - два блока индикации



Рисунок 2. Оптическая схема прибора 1ПН59

готовления и, особенно, фотоприёмника «Лена ФН» проходили длительно и сложно. В основном был доработан фотоприемник, убрали низкочастотные шумы, исключили помехи, наводки в электронном тракте, добились хорошего качества изображения. Тепловизионный прибор наблюдения 1ПН59 имел большую массу 80 кг, габариты и потребляемую мощность 600 Вт. Но это был первый серийный тепловизионный наблюдательный прибор в СССР с дальностью распознавания целей до 2000 м.

#### ПРИБОР 1ПН71

В 1982 г. была поставлена ОКР «Пособие-2» (индекс изделия 1ПН71) по разработке тепловизионного прибора с ещё большей дальностью обнаружения/распознавания на ФПУ, работающем в спектральном диапазоном 8..14 мкм, так как в этой области спектра выше пропускание атмосферы, выше контрасты реальных тепловых картин.

К этому времени основные разработчики фотоприемников (НИИ ПФ, ГОИ и завод «Сапфир») освоили новый чувствительный материал: кадмий-ртуть-теллур (КРТ). В НИИ ПФ был разработан 64 элементный фотоприемник на КРТ, на базе которого была выполнена ОКР «Невесомость-64».

В отличие от фотоприемника «Лена ФН» (разработка завода «Сапфир»), ФПУ «Невесомость-64» содержит 64 чувствительных

элемента КРТ размером 50×50 мкм, расположенных в виде линейки с шагом 100 мкм, и 64-х канальный усилитель. Система охлаждения до температуры 77 К имела меньшую массу, габариты и энергопотребление.

Принцип работы, состав и общая компоновка прибора 1ПН71 (рис. 3) аналогичны прибору 1ПН59. Отличие состояло в том, что в приборе 1ПН71 применили оптико-механическую чересстрочную развертку, что эквивалентно удвоению числа чувствительных элементов.

Поэтому в приборе 1ПН71 формируется поле зрения такой же величины, что и в приборе 1ПН59, но с количеством тепловизионных строк 128, что позволило при одинако-



Рисунок 3. Тепловизионный прибор разведки 1ПН71



Рисунок 4. Оптическая схема изделия 1ПН71

вых габаритах и массе получить в 1,5 раза большую дальность распознавания. Кроме того, повышенная до 33 Гц частота сканирования (вместо 16 Гц в приборе 1ПН59) позволила уменьшить мелькание изображения и повысить его качество.

Опыт работы с первыми тепловизионными приборами наблюдения показал необходимость введения эксплуатационной фокусировки при работе в различных климатических условиях (особенно при минусовых температурах), а также фокусировки на близко расположенные цели. Поэтому в приборе 1ПН71 были введены дистанционно управляемая от электропривода фокусировка малого зеркала насадки и сезонная (зима/лето) ручная фокусировка предпоследней линзы объектива. Оптическая схема изделия содержит основной четырёхлинзовый объектив и зеркальную телескопическую насадку с увеличением 3,3<sup>x</sup>. Зеркала насадки асферические: два параболоида. Оптическая схема прибора 1ПН71 представлена на рис. 4, а основные оптические параметры - в табл. 1.

В 1990 г. такая оптическая схема удовлетворяла всем требованиям, предъявляемым к прибору. Смена полей зрения осуществлялась выводом вторичного зеркала 3 из хода лучей. Перемещением этого же зеркала вдоль оси осуществляется фокусировка изображения на конечное расстояние в узком поле зрения. Детали 2 и 3 – зеркальные параболоиды, составляющие систему Мерсенна. Сканирование происходит в сходящемся пучке

Таблиц	a 1.
Параметры	объективо

Оптические параметры	Объектив поз. 1, 4-8	Объектив поз. 1-8
Угловое поле в пространстве предметов, град.	3,4×4,3	1,0×1,3
Диаметр входного зрачка, мм	80	240
Относительное отверстие	1:1,35	1:1,5
Предел разрешения, угл. с.	80	25
Коэффициент пропускания	0,6	0,5



Рисунок 5. Тепловизионный прибор наблюдения 1ПН126 1 - устройство приемное; 2 - модуль электронной обработки; 3 - блок управления приводом; 4 - блок коммутации

лучей за счет наклонов зеркала 5. Следует отметить, что оба параболоида имеют чрезмерно большое относительное отверстие – 1:0.85 и их изготовление сопряжено с известными трудностями. Это относится также к сборке насадки, так как незначительная децентрировка вторичного зеркала (по наклону 5..10», а по линейному смещению 0,01..0,03мм) приводит к появлению комы и снижению контраста изображения, а небольшой перетяг главного зеркала в оправе вызывает сильный астигматизм.

Основные недостатки оптической схемы прибора 1ПН71:

- большие габариты и масса;

- большой размер и масса сканирующего зеркала;

- существенное ухудшение качества изображения при увеличении полей зрения в узком поле, что обусловлено возрастанием аберраций системы Мерсенна;

- центральное экранирование в узком поле зрения;

- отсутствие плоскости промежуточного изображения для установки в ней кадрового окна с опорными излучателями.

Производство приборов 1ПН59 и 1ПН71 было освоено на Новосибирском приборо-

строительном заводе и серийно приборы выпускались в 1987..1995 гг.

При разработке и, особенно, при серийном производстве тепловизионных приборов возникли следующие проблемы:

 оптико-механическое сканирование потребовало разработки сканеров с чересстрочной разверткой с обеспечением высокой степени повторяемости закона сканирования и высокоточными датчиками положения;

- асферические зеркальные объективы потребовали освоения технологии асферизации поверхностей с диаметром до 300 мм;

- оптические материалы, непрозрачные в видимой области спектра и почти все токсичные в обработке, потребовали особой технологии изготовления и утилизации отходов;

- потребовалось освоение в производстве просветляющих покрытий, без которых невозможно использование ИК-оптики;

 традиционные методы и оборудование, применяемые в видимой области спектра для сборки, юстировки и проверки оптических приборов, в большинстве своем не подходили для непрозрачной ИК-оптики. Потребовалась разработка новых комплексов контрольной, юстировочной и метрологической аппаратуры;  сканирующий тепловизионный прибор – сложный оптико-электронный механический прибор, в котором много электронных блоков и узлов. Потребовалась разработка методик, инструкций, контрольных стендов для настройки электронных печатных плат, блоков и прибора в целом.

#### ПРИБОР 1ПН126

В 2005 г. «ЦКБ «Точприбор» разработало наблюдательный приборный комплекс разведки «**Аргус-АТ**» в составе тепловизионного прибора 1ПН126 с лазерным дальномером и дневно-ночного прибора 1ПН125.

Тепловизионный наблюдательный прибор разведки 1ПН126 был предназначен для замены приборов 1ПН59, 1ПН71. Управлять работой этого прибора можно как с пульта, так и с бортовой ЭВМ.

В состав приемного устройства 1ПН126 входят: тепловизионный канал, разработанный на базе модульного фотоприемного устройства АПУ-РЛ-412 (ФГУП «Альфа»), дальномерный канал и автоматизированный привод наведения по углу места цели (рис. 5). В качестве фотоприемного устройства используется линейка с количеством чувствительных элементов 2×32, размером 30×30 мкм, материал КРТ, спектральный диапазон 8..12 мкм.

В оптической схеме используется линзовая насадка галилеевского типа с дискретным увеличением. Объясняется это тем, что поля



Рисунок 6. Изображение на экране монитора 1ПН126

зрения были увеличены в 1,5 раза. При таких полях изопланатическая насадка Мерсенна даёт большую сферическую аберрацию по полю. Кроме того существуют различия по способу сканирования: в приборе 1ПН71 сканирование осуществляется плоским зеркалом в сходящихся пучках лучей, а в приборе 1ПН126 многогранной германиевой призмой.

Насадка в узком поле зрения представляет собой фронтальный мениск 1 (объектив) и окуляр 3, 4, за которым идёт параллельный пучок лучей. В широком поле зрения работает мениск 1 и линза 2, за которыми также идет параллельный пучок лучей. Смена полей зрения осуществляется поворотом деталей 2, 3, 4 вокруг оси O<sub>1</sub> на 90° в направлении P (рис. 7).

В автоматизированном приводе наведения по углу места цели, представляющего собой цифровую систему автоматического управления, в качестве исполнительного устройства используется электродвигатель и зубчаточервячный редуктор, а датчиком обратной связи служит оптоэлектронный датчик угла. В качестве задающего устройства, формирующего установку заданного угла, используется аппаратура комплекса средств автоматизации машины разведки, которая через модуль электронной обработки выдает в контроллер привода заданный угол места цели и скорость наведения приемного устройства.

Погрешность измерения углов места цели в ручном и автоматическом режимах, отсчитываемых от нулевого положения, не более 0-02 в диапазоне от минус 5° до 15°. В режиме наблюдения используются шесть рабочих скоростей управления приводом от 0,05 °/с до 3°/с.

В модуле электронной обработке помимо преобразования видеосигнала в телевизионный формат, проводится цифровая обработка изображения. В состав модуля входит оконечное устройство, которое по магистральному каналу (основному и резервному) обменивается сообщениями с автоматизированным рабочим местом комплекса средств автоматизации машины разведки.



Рисунок 7. Оптическая схема прибора 1ПН126

Блок коммутации осуществляет подачу напряжения питания от бортсети, обеспечивает защиту аналоговой и силовых цепей от перегрузки по току и от включения напряжения обратной полярности, а также контроль времени наработки изделия по счетчику моточасов.

В состав оптической системы приемного устройства входят:

- телескопическая насадка с механизмом переключения полей;

- объектив с механизмом фокусировки, формирующий промежуточное изображение в кадровом окне;

- сканер, представляющий собой вращающуюся восьмигранную германиевую призму, противоположные грани которой имеют одинаковый угол наклона к оси вращения; - оптика переноса изображения, строящая изображение в плоскости фотоприёмного модуля.

При вращении сканер смещает изображение перпендикулярно линейке ФПМ, формируя развёртку по строке, и трижды за время кадра последовательно сдвигает его после каждого просмотра вдоль линейки ФПМ на величину, равную её длине, формируя четыре зоны вдоль кадра. За один оборот призмы формируется два кадра. Далее сигналы с ФПМ усиливаются, коммутируются и поступают в МЭО, для обработки и преобразования в телевизионный сигнал, который поступает на ВСУ, на экране которого формируется тепловизионное изображение.

Тепловизионный прибор наблюдения 1ПН126 был разработан для ПРП-4А (рис. 8).



Рисунок 8. ПРП-4А

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлено описание основных схемотехнических принципов построения ряда тепловизионных приборов для объектов БТТ разработки ОАО «Швабе – Приборы» и ОАО «Швабе – Оборона и Защита». Представленная ретроспектива позволяет оценить эволюцию развития данной области приборостроения, начиная с середины XX века.

#### Список литературы:

 Точприбор: Монография: в 3 т [под ред.
В.В. Малинина]. Новосибирск: Наука, 2011.
Том 1: Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск. С. 165 – 176, 295.

2. Коронин Ю.Н., Попов Г.Н., Касаткин И.В. Многоканальные оптико-электронные системы разведки и целеуказания // Комплексное решение проблемы создания систем высокоточного оружия: сб. докладов научно-практ.

конф. (Волгоград, 20-21 мая 2010 г.) – Волгоград, 2010. – С. 100 – 102.

Список литературы (транслитерированный):

1. Tochpribor: Monography: in 3 vol. (ed. V.V. Malinin) – Vol. 1. Optical and Optoelectronic Devices, Targeting and Observing Systems for Land Forces. [Tochpribor: Monographiya: v 3 t. (pod red. V.V. Malinina) – Tom 1. Opticheskie i optico-electronnye pribory, sistemy pricelivaniya, razvedki i nabludeniya dlya suhoputnyh voisk], Novosibirsk, Nauka, 2011, p. 165-176, 295.

2. Koronin U.N., Popov G.N., Kasatkin I.V. Multichannel Optoelectronic observing and targeting systems. // Umbrella approach of the high-precision weapon systems development. [Mnogokanalnye optico-electronnye sistemy razvedki i celeukazaniya. // Kompleksnoe reshenie problem sozdaniya vysokotochnogo orujiya]: book of the conf. (Volgograd, 20-21 may 2010) – Volgograd, 2010. – p. 100 – 102.

#### ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТОК

#### БЕССМЕЛЬЦЕВ В.П., ДОСТОВАЛОВ А.В.

Федеральное Государственное бюджетное Учреждение Науки Институт Автоматики и Электрометрии Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИАиЭ СО РАН)

E-mail: bessmelt@iae.nsk.su

На большинстве предприятий оптико-механической промышленности России для производства сеток применяются устаревшие технологии, при которых формирование топологии рисунка сетки производится за счет механического удаления масочного слоя нанесенного на стеклянную подложку, с последующим травлением подложки плавиковой кислотой. Указанная технология не удовлетворяет современным требованиям, как по гибкости и производительности, так и по точности и разрешающей способности. Проведенные в ИАиЭ СО РАН исследования инициированные ОАО «Вологодский оптико-механический завод» и затем активно поддержанные ОАО «Швабе-Оборона и Защита» (г. Новосибирск) показали, что современные методы лазерной микрообработки позволяют формировать изображения в виде сеток шириной от 3 мкм с контролируемой глубиной на большинстве стекол использующихся в производственных процессах предприятий холдинга «Швабе».

**Ключевые слова:** лазерная абляция стекол, длинные лазерные импульсы, сверхкороткие лазерные импульсы.

#### введение

Одним из широко распространенных методов поверхностной модификации материалов является метод лазерной абляции, при котором удаление материала происходит под воздействием лазерного излучения. Применение лазеров для абляции стекол имеет некоторые особенности, связанные с тем, что многие стекла прозрачны от УФ до ИК диапазона длин волн (рис. 1) [1]. По этой причине процесс абляции стекол исследовался ранее с использованием СО, лазера с длиной волны 10,6 мкм [2]. Кроме того, некоторые стекла имеют нижнюю границу прозрачности выше 300 нм (например, стекло ВК7), что делает возможным применение УФ лазеров с длительностью импульсов ~ 1 нс пригодными для абляции [3]. С развитием фемтосекундных технологий (1 фс = 10-15 с) стало возможным использовать лазеры, работающие на длине волны видимого или ближнего ИК диапазона для абляции стекол прозрачных на данных длинах волн [4]. При этом качество микромодификаций в данном случае, по сравнению с результатами воздействия более длительных импульсов, гораздо выше, вследствие того, что физические процессы, связанные с абляцией длинными (~ мс, нс) и сверхкороткими (~ пс, фс) импульсами имеют совершенно разный характер.

При воздействии длинных импульсов происходит локальный разогрев материала вследствие поглощения импульса, при этом процесс диссипации энергии из области фокусировки начинается до завершения импульса, что снижает эффективность поглощения энергии. По этой причине в данном случае порог абляции будет гораздо выше, чем в случае сверхкоротких импульсов. При длинных импульсах преобладает тепловой режим модификации, когда в точке фокусировки после стремительного нагрева материала происходит его расплав и образование тепловой волны, которая распространяется в соседние области материала, при этом образуются микротрещины и сколы на поверхности стекла что значительно ухудшает качество поверхностных структур (рис. 2).



Рисунок 1. Диапазоны прозрачности для различных стекол

В то же время режим воздействия на материал сверхкороткими лазерными импульсами исключает данные дефекты, а также позволяет локализовать поглощение в масштабах меньших дифракционного предела (~ 100 нм). Это возможно благодаря нелинейному характеру поглощения сверхкоротких лазерных импульсов. В процессе распространения такого импульса часть энергии излучения тратится на возбуждение валентных электронов через механизм нелинейной фотоионизации. Если импульс имеет длительность более 10 фс, возбужденные электроны получают дополнительную кинетическую энергию через механизм обратного тормозного поглощения. При достижении электроном энергии равной энергии запрещенной зоны, такой электрон ионизует дополнительный связанный электрон посредством ударной ионизации. Когда плотность электронов достигнет критического значения рBD ~ 1021 см<sup>-3</sup>, электроны начинают вести себя как плазма, что приводит к рассеянию оставшейся части импульса и испарению материала с поверхности. При этом, время электрон-фононной релаксации составляет ≈10 пс, что больше длительности импульса, поэтому процесс поглощения энергии происходит эффективно поскольку импульс не взаимодействует с разогретым материалом, соответственно порог по модификации становится меньше, что уже в свою очередь приводит к локализации

модификации и отсутствию микротрещин и сколов. Кроме того, поскольку абляция материала происходит вследствие образования плазмы, для генерации которой не требуется наличие изначально свободных электронов в материале, процесс абляции становиться более воспроизводимым по сравнению с длинными импульсами, что очень важно в промышленных применениях.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТОК ПО ТЕХНОЛОГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ОБРАБОТКИ

Исследования проводились на установке по прецизионной модификации поверхности прозрачных материалов (рис. 3). Излучение



Рисунок 2. Наносекундная обработка стекла (λ = 266 нм, τ = 10 нс) [5]



Рисунок 3. Схема экспериментальной установки по модификации поверхности прозрачных материалов

фемтосекундного лазера (средняя мощность 6W длина волны основной гармоники 1026 нм, длительность импульса на полувысоте 232 фс) через систему поворотных зеркал (31-2, Д3) заводилось на фокусирующую оптику — асферическую линзу (О). С помощью системы ослабления пучка, состоящей из двух полуволновых пластинок и поляризатора (П), устанавливался необходимый уровень энергии импульса. С помощью расширителя пучка (РП) устанавливался необходимый размер пучка на входе фокусирующей оптики. Перемещение образца производилось с помощью системы высокоточных координатных столов Aerotech с полем сканирования 25×100×6 мм<sup>2</sup>, механический поворотный стол (ПС) позволял выставлять плоскостность поверхности образца по всей области сканирования.

С помощью подсветки (С) и КМОП-камеры выполнялась настройка положения области фокусировки и плоскостность при перемещениях. Энергия импульсов лазерного излучения контролировалась измерителем энергии импульсов Coherent J-10MT-10KHZ (ФД).

Настройка перед записью выполнялась в несколько этапов:

1. Настройка положения образца по углам (φ, ψ см. рис. 3) для обеспечения высокого качества модификации по всей области сканирования.

2. Настройка положения фокуса относительно поверхности образца.

3. Совмещение центра образца с началом системы координат стола.

4. Совмещение направления перемещения стола с ориентацией образца в плоскости х-у (для симметричных образцов данный шаг не нужен).

Исследовались режимы обработки различных стекол и кристаллов для получения элементов сеток регулируемой ширины 3-15 мкм и глубины 1-10 мкм. Режимы выбирали по критерию быстродействия, точности и минимизации дефектов в виде микротрещин и микро сколов (рис. 4).

В результате получены статистические зависимости показателей качества микроканалов от энергии и перекрытия импульсов для данного материала. По полученным зависимостям возможно определение режима лазерной микрообработки для получения микроканалов с заданными параметрами ширины и глубины. При неоптимальном режиме обработки отклонение от прямолинейности границ достигает 1 мкм, что хорошо соответствует размерам образующихся сколов.

Изготовлены опытные партии образцов специальных сеток на различных стеклах, полностью соответствующих техническим условиям и чертежам, предоставленным Заказчиком и принятым ОТК Заказчика (рис. 5).



Тестовые записи по стеклу К8 (а-f увеличение скорости записи на 5 %)

В рамках работ по проекту № 2012-218-03-004 Министерства образования и науки РФ разработана и в настоящее время изготавливается лазерная технологическая рабочая станция на основе лазера с перестраиваемой длительностью импульсов (фемто-, пико-) для микрообработки заготовок из оптического стекла и кристаллов на основе лазерного источника с перестраиваемой длительностью импульсов (200 фемтосекунд -10 пикосекунд), длины волн: 1030 нм, 515 нм, 343 нм, режим генерации – модуляция добротности с частотой 50-200 кГц, средняя мощность не менее 10 Вт. Механическая трехкоординатная система позиционирования позволяет обрабатывать детали и заготовки с диапазоном перемещения 200х200х100 мм и дискретностью шага перемещения 50 нм. Рабочая станция снабжена универсальной пневматическая системой для вакуумной фиксации заготовок и деталей в зоне лазерной обработки и высокоразрешающей видеокамерой оптического контроля процесса микрообработки с комбинированной подсветкой (прямое освещение, косое освещение, рассеянный свет).

#### Список литературы:

1. G. a J. Markillie, H. J. Baker, F. J. Villarreal, and D. R. Hall, "Effect of vaporization and melt ejection on laser machining of silica glass microoptical components.," Appl. Opt., vol. 41, no. 27, pp. 5660–7, Sep. 2002.

2. *K. Zimmer*, "Etching of fused silica and glass with excimer laser at 351 nm," Appl. Surf. Sci., vol. 208–209, pp. 199–204, Mar. 2003.

3. *M. Lenzner, J. Krüger, W. Kautek, and F. Krausz,* "Rapid communication Precision laser ablation of dielectrics in the 10 - fs regime," vol. 371, no. 1999, pp. 369–371, 2000.

4. B. Lan, M.-H. Hong, K.-D. Ye, Z.-B. Wang, S.-X. Cheng, and T.-C. Chong, "Laser Precision Engineering of Glass Substrates," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 43, no. 10, pp. 7102–7106, Oct. 2004.

5. *P. Rudolph, J. Bonse, J. Krüger, and W. Kautek,* "Femtosecond- and nanosecond-pulse laser ablation of bariumalumoborosilicate glass," vol. 766, pp. 763–766, 1999.





Рисунок 5. а) Увеличенное изображение лазерной обработки поверхности образца b) Результат измерения глубины модификации:

b1) область измерения профиля модификации (вдоль красной линии), b2) - профиль модификации по высоте

#### ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ В СИСТЕМЕ СФЕРИЧЕСКОГО ОБЗОРА

#### ШИРОКОВ Р. И., АЛЕХНОВИЧ В.И.

#### Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

#### E-mail: m.scofield@mail.ru, vial@rl2.bmstu.ru

В статье рассмотрена оптико-электронная локационная система полного (сферического) обзора, состоящая из шести отдельных оптических систем (инфракрасных камер). Указано расположение ИК камер на летательном аппарате. Приведено краткое описание принципа действия этой системы. Разработаны геодезический метод юстировки и метод юстировки со вспомогательной камерой. Разработаны алгоритмы нахождения правил перехода между системой координат летательного аппарата, системой координат тахеометра и системой координат отдельной оптической локационной станции. Приведена оценка погрешности рассмотренных алгоритмов.

**Ключевые слова:** Оптико-электронная станция, юстировка, привязка, матрица перехода, погрешность входных данных, статистическое моделирование.

#### введение

Оптико-электронная локационная система (ОЭЛС) полного обзора - многокомпонентная система наблюдения. Она представляет собой совокупность шести камер, работающих в инфракрасном диапазоне излучения и расположенных таким образом, чтобы обеспечивать непрерывный сферический обзор с формированием видеоизображений окружающей обстановки. Поле обзора системы – сфера (для 6 постов), т.е. поле обзора одной камеры составляет 90°×90° (рис. 1).

Одной из самых важных задач является юстировка данной многокомпонентной системы на борту летательного аппарата, то есть размещение всех локационных станций (ЛС) в определённые посадочные места и их привязка к строительной системе координат (система координат летательного аппарата). Далее реализуется алгоритм формирования панорамного изображения на кубе или на сфере.

Предложено два подхода – геодезический метод юстировки и метод юстировки с помощью вспомогательной камеры.



Рисунок 1. Сферическая зона обзора ОЭЛС

#### 1. Геодезический метод юстировки ОЭЛС

Данный подход основан на использовании высокоточного геодезического прибора – тахеометра.



Рисунок 2. Расположение ЛС: а) - вид сверху, б) - вид сбоку

#### 1.2. Методика юстировки

На нижней поверхности планера имеются три базовые точки, положение которых в системе координат самолета (СКС) известно с точностью 5 мм и не меняется при деформациях самолета. Две точки расположены под левым и правым крылом, ближе к фюзеляжу, третья точка расположена в плоскости симметрии ближе к носу планера. Указанные точки будут использоваться для нахождения перехода между СКС и системой координат тахеометра (СКТ) (рис. 3).

Тахеометр будет располагаться рядом с планером (рис. 4). В связи с тем, что базовые точки расположены на нижней поверхности планера, они могут не входить в поле зрения тахеометра. Поэтому необходимо использовать выносную линейку с известной длиной. Линейка последовательно прикладывается одним концом к каждой из базовых точек. На другом конце линейки находится маркер, пригодный для измерения его положения тахеометром. Таким образом, будут формироваться вынесенные базовые точки (ВБТ). Измерив их координаты и зная длину линейки, можно найти переход между СКС и СКТ, а именно вектор переноса и матрицу поворота.

Следующим этапом будет последовательное выставление в полях зрения различных ЛС источников излучения (ИИ) на штативе. ИИ будет выставляться таким образом, чтобы можно было измерить его координаты при помощи тахеометра. Получив координаты ИИ в СКТ, можно преобразовать их в координаты в СКС. Определив при помощи ЛС угловое положение нескольких ИИ, измерив дальность, и зная их положение в СКС, можно привязать все ЛС (выбрав систематическую ошибку) к СКС.

Таким образом, процесс юстировки можно разделить на ряд этапов:

1. Размещение тахеометра таким образом, чтобы при помощи него можно было опре-



Рисунок 3. Расположение вынесенных базовых точек и тахеометра. Вид спереди

делять положение вывешенных базовых точек и ИИ.

2. Нахождение правила перехода между СКС и СКТ по найденным при помощи тахеометра положениям ВБТ.

3. Размещение вешки в различных местах поля зрения ЛС и определение её координат в СКС и углового положения при помощи ЛС.

4. По ряду координат ИИ в СКС и соответствующих им угловых координат, выданных ЛС, осуществляется привязка всех ЛС к СКС.

#### 1.3. Правило перехода между СКС и СКТ по трём ВБТ геометрическим методом

Пусть имеются три ВБТ: А, В и С. Их координаты в СКС и в СКТ равны соответственно  $A_c = \{x_c^A, y_c^A, z_c^A\}, B_c = \{x_c^B, y_c^B, z_c^B\}$  $C_c = \{x_c^C, y_c^C, z_c^C\}$  и  $A_T = \{x_T^A, y_T^A, z_T^A\}$ ,  $B_T = \{x_T^B, y_T^B, z_T^B\}$ ,  $C_T = \{x_T^C, y_T^C, z_T^C\}$ . Расположим все эти шесть точек в одной системе координат (например, в СКС) как показано на рис. 4.

Тогда получается, что две системы координат (СКС и СКТ) совмещены в одну. Далее, если мы последовательно совместим соответствующие точки треугольников  $A_c B_c C_c$  и  $A_T B_T C_T$  (совместим треугольники), получим изначальное положение СКС и СКТ друг относительно друга, а, значит, получим правило преобразование одной СК в другую и наоборот.



Рисунок 4. Совмещение точки  $A_T$  с точкой  $A_c$ 

#### Алгоритм совмещение треугольников.

а). Совместим любую точку одного треугольника с соответствующей точкой другого треугольника. Например, точку  $A_T$  с точкой  $A_c$ . Для этого выполним параллельный перенос (рис. 4) треугольника  $A_T B_T C_T$  по вектору  $\vec{b} = (x_c^A - x_T^A, y_c^A - y_T^A, z_c^A - z_T^A)$ , умножив вектор координат каждой точки треугольника на матрицу перемещения:

$T_b =$	( 1	0	0	0)
	0	1	0	0
	0	0	1	0
	(b(1)	<i>b</i> (2)	<i>b</i> (3)	1)

Тогда точка  $C_T$  перейдёт в  $C'_T$ , точка  $B_T$  - в  $B'_T$  (рис. 4).

б). Далее совместим точку  $B'_{T}$  с  $B_{c}$  при помощи поворота вокруг оси, проходящей через точку  $A_{c}$  и перпендикулярной плоскости  $B_{c}A_{c}B'_{T}$ , на угол  $\alpha$ . Направляющий вектор  $\vec{n}_{1}$ этой оси определим с помощью векторного произведения  $\overline{A_{c}B_{c}} \times \overline{A_{c}B'_{T}}$  (рис. 4). Результат векторного произведения (вектор) перенесём из начала координат в точку  $A_{c}$  с помощью умножения  $B_{c} \times B'_{T}$  справа на матрицу переноса  $T_{n_{1}}$ .

$$T_{n_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_c^A & y_c^A & z_c^A & 1 \end{pmatrix}$$

Угол  $\alpha$  находится через скалярное произведение векторов  $\overrightarrow{A_cB_c}$  и  $\overrightarrow{A_cB_T}$ . Точка  $C_T'$  перейдёт в точку  $C_T''$  (рис. 5).

в). Наконец, совместим точку  $C_T''$  с точкой  $C_c$ . Для этого повернём её вокруг образовавшейся линии вращения  $A_c B_c$  на угол  $\beta$ . Угол  $\beta$  между двумя плоскостями треугольников определяется как угол между соответствующими нормалями этих плоскостей  $N_1$  и  $N_2$  из скалярного произведения.

г). В пунктах б), в) выполняется вращение вокруг некоторой произвольной оси. Рассмотрим более подробно эту процедуру в общем случае [1, 2].



Рисунок 5. Поворот вокруг оси A<sub>c</sub>B<sub>c</sub>

Предположим, что произвольная ось в пространстве проходит через точку  $(x_0, y_0, z_0)$  с направляющим вектором  $(c_x, c_y, c_z)$ . Поворот вокруг этой оси на некоторый угол  $\delta$ выполняется по следующему правилу: 1) выполнить перенос так, чтобы точка  $(x_0, y_0, z_0)$ находилась в начале системы координат; 2) выполнить соответствующие повороты так, чтобы ось вращения совпала с осью z; 3) выполнить преобразование, обратное тому, что позволило совместить ось вращения с осью z; 5) выполнить обратный перенос.

В общем случае для того, чтобы произвольная ось, проходящая через начало координат,

совпала с одной из координатных осей, необходимо сделать два последовательных поворота вокруг двух других координатных осей. Для совмещения произвольной оси вращения с осью z сначала выполним поворот вокруг оси x, а затем вокруг оси y. Чтобы определить угол поворота  $\alpha$  вокруг оси x, используемый для перевода произвольной оси в плоскость xz, спроецируем сначала на плоскость yz направляющий единичный вектор этой оси (рис. 6а).

Компоненты *у* и *z* спроецированного вектора равны  $c_y$  - и  $c_z$  - компонентам единичного направляющего вектора оси вращения. Из рисунка ба следует, что:

$$d = \sqrt{c_y^2 + c_z^2} \tag{1}$$

$$\cos \alpha = \frac{c_z}{d}, \ \sin \alpha = \frac{c_y}{d}$$
(2)

После перевода в плоскость xz с помощью поворота вокруг оси x, z-компонента единичного вектора равна d, а x- компонента равна  $c_x$ , т.е. x-компоненте направляющего вектора, как это показано на рисунке бб. Длина единичного вектора равна, конечно, единице. Таким образом, угол поворота  $\beta$  вокруг оси y, необходимый для совмещения произвольной оси с осью z, равен:

$$\cos\beta = d , \sin\beta = c_r . \tag{3}$$



Рисунок 6. Повороты, необходимые для совмещения с осью z единичного вектора OP : (a) - поворот вокруг X; (б) - поворот вокруг У

Тогда полное преобразование можно представить в виде:

$$M = T \cdot R_x \cdot R_y \cdot R_\delta \cdot R_y^{-1} \cdot R_x^{-1} \cdot T^{-1} , \qquad (4)$$

где матрица переноса, матрица поворота вокруг оси *x* и матрица поворота вокруг оси *y* равны соответственно:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_0 & -y_0 & -z_0 & 1 \end{bmatrix} , \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_z/d & c_y/d & 0 \\ 0 & -c_y/d & c_z/d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$R_y = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & 0 & -\sin(-\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\beta) & 0 & \cos(-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d & 0 & c_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c_x & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

И, наконец, вращение вокруг произвольной оси задается матрицей поворота вокруг оси z:

$R_{\delta} =$	$\cos\delta$	$\sin\delta$	0	0
	$-\sin\delta$	$\cos\delta$	0	0
	0	0	1	0
	0	0	0	1

На практике углы  $\alpha$  и  $\beta$  не вычисляются явным образом. Элементы матриц поворотов  $R_x$  и  $R_y$  в (4) получаются из уравнений (1) - (2) за счет выполнения двух операций де-

ления и извлечения квадратного корня. Хотя данные результаты были разработаны для произвольной оси в первом квадранте, они применимы во всех квадрантах.

Если компоненты направляющего вектора произвольной оси неизвестны, то, зная вторую точку  $(x_1, y_1, z_1)$  на оси, их можно определить, нормализовав вектор, соединяющий первую и вторую точки. Более точно, вектор оси из  $(x_0, y_0, z_0)$  в  $(x_1, y_1, z_1)$  равен

$$V = [(x_1 - x_0) \quad (y_1 - y_0) \quad (z_1 - z_0)]$$

Нормализация дает компоненты направляющего вектора:

$$\begin{bmatrix} c_x & c_y & c_z \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} (x_1 - x_0) & (y_1 - y_0) & (z_1 - z_0) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}}}$$

Итак, выполним вращение на угол  $\alpha$ :

$$\left(c_{x},c_{y},c_{z}\right) = \frac{\left(n_{1}(1) - A_{c}(1),n_{1}(2) - A_{c}(2),n_{1}(3) - A_{c}(3)\right)}{\sqrt{\left(n_{1}(1) - A_{c}(1)\right)^{2} + \left(n_{1}(2) - A_{c}(2)\right)^{2} + \left(n_{1}(3) - A_{c}(3)\right)^{2}}}$$

- компоненты направляющего вектора.
$$\begin{split} T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -A_c(1) & -A_c(2) & -A_c(3) & 1 \end{pmatrix} \\ R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_z}{d} & \frac{c_y}{d} & 0 \\ 0 & -\frac{c_y}{d} & \frac{c_z}{d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} , \\ R_y = \begin{pmatrix} d & 0 & c_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c_x & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} , \\ rge \ d = \sqrt{c_y^2 + c_z^2} . \\ R_\alpha = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \end{split}$$

$$M_{1} = T_{1} \cdot R_{x} \cdot R_{y} \cdot R_{\alpha} \cdot R_{y}^{-1} \cdot R_{x}^{-1} \cdot T_{1}^{-1} \Longrightarrow$$
  

$$B_{T}'' = (B_{T}'(1), B_{T}'(2), B_{T}'(3), 1) M_{1},$$
  

$$C_{T}''' = (C_{T}'(1), C_{T}'(2), C_{T}'(3), 1) M_{1}.$$

Аналогично выполняется поворот на угол  $\beta$  вокруг  $A_c B_c$  и находится матрица  $M_2$ . Следовательно, получаем, что

 $M_{T \to C} = T_b \cdot M_1 \cdot M_2$  - общая матрица перехода из СКС в СКТ,

 $M_{C \to T} = M_{T \to C}^{-1} = (M_{T \to C})^{T}$  - общая матрица перехода из СКТ в СКС.

При этом, чтобы перевести координаты точки из СКТ в СКС необходимо умножить вектор координат точки в СКТ на  $M_{C \to T}$  слева:

$$K_{c\kappa c} = M_{C \to T} \cdot K_{c\kappa m}$$

где  $K_{c\kappa m}$ - координаты точки в СКТ, а  $K_{c\kappa c}$ - координаты той же точки в СКС.

Аналогичным образом определяется правило перехода между СКС и СК ЛС.

# 1.4. Погрешность описанного алгоритма нахождения матрицы перехода.

При помощи статистического моделирования [3] была проведена оценка погрешности рассмотренного выше алгоритма.

 $\Delta M^* = \left\| M - M^* \right\|$  - абсолютная погрешность,  $\delta M^* = \frac{\Delta M^*}{\|M\|}$  - относительная погрешность.

Приведем оценку погрешности пересчёта координат из СК ЛС в СКС. Погрешность угловых измерений ЛС равна 20', погрешность измерения дальности до ЛС - 7 мм. Тогда

$$\Delta P^* = 30'$$
 (угловых минут),  
 $\delta P_3^* = 0.035$ .

# 1.5. Алгоритм определения расстояния от ИИ до СК ЛС.

Для определения расстояния от вешки (ИИ) до СК ЛС нам понадобятся тахеометр и цилиндрическая насадка на объектив камеры с выступающим стержнем, на конце которого расположен некоторый маркер. Рассмотрим концептуальную схему для определения расстояния от центра СК ЛС до выбранного источника излучения (рис. 7).

Т-тахеометр,

И – источник излучения,

h – сложная линза камеры,

N – маркер на стержне цилиндрической насадки.



Рисунок 7. Концептуальная схема

Необходимо определить расстояние от точки  $\hat{E}$  до точки M. Координаты  $\hat{E}$  и N - измеряются тахеометром относительно своей системы координат (СКТ). Таким образом, можно найти расстояние  $\hat{E}N$  координатным способом, переведя их в декартову систему координат тахеометра, по формуле:

$$\dot{E}N = \sqrt{(x_{\dot{E}} - x_N)^2 + (y_{\dot{E}} - y_N)^2 + (z_{\dot{E}} - z_N)^2},$$

где  $(x_{\dot{E}}, y_{\dot{E}}, z_{\dot{E}})$  - декартовы координаты точки  $\dot{E}$  в СКТ,

 $(x_N, y_N, z_N)$  - декартовы координаты точки N в СКТ.

Расстояние MN складывается из длины стержня на насадке и расстояния от вершины первой линзы до первой главной плоскости (L + 19.5 *мм* (23.14 *мм*)). Угол  $\varphi$  можно найти, используя азимут и угол места, выдаваемые ЛС - ей, по формуле:

 $\varphi = \arccos(\cos(\alpha)\cos(\varepsilon))$ ,

где  $\alpha$  - азимут,  $\varepsilon$  - угол места.

Далее найдём искомое расстояние  $\dot{E}M$ . Обозначим  $\dot{E}M$  как x,  $\dot{E}N$  - как v, NM - как a. Тогда имеет место теорема синусов:

$$\frac{v}{\sin(\varphi)} = \frac{a}{\sin(\alpha)}$$

Отсюда находим угол  $\alpha$ , а затем и угол  $\beta$ :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{a\sin(\varphi)}{v}\right), \ \beta = 180 - \alpha - \varphi$$

Для нахождения *x* ещё раз применим теорему синусов  $\frac{x}{\sin(\beta)} = \frac{a}{\sin(\alpha)}$ .

Тогда окончательно получаем:

$$x = \frac{a\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{a\sin\left(180 - \varphi - \arcsin\left(\frac{a\sin(\varphi)}{v}\right)\right)}{\sin\left(\arcsin\left(\frac{a\sin(\varphi)}{v}\right)\right)} = v\sqrt{1 - \frac{a^2\sin^2(\varphi)}{v^2}} + a\cos(\varphi)$$

т.е. искомое расстояние равно:

 $\dot{E}M = \sqrt{v^2 - a^2 \sin^2(\varphi)} + a \cos(\varphi) \,.$ 

# 2. Метод юстировки ОЭЛС при помощи вспомогательной камеры

Привязка всех постов ОЭЛС делается попарно. Для этого используются два транспаранта, которые представляют собой две плоские поверхности, с размещёнными на них  $N_p$  источниками излучения (ИИ). Координаты ИИ относительно СК транспаранта известны. При этом, ориентация одного транспаранта относительно другого (матрица перехода из СК транспаранта 1 в СК транспаранта 2) определяется при помощью вспомогательной системы координат. В качестве таковой системы координат используется связующая камера (широкоугольная камера с высоким разрешением). Алгоритм привязка пары постов ОЭЛС состоит из следующих этапов:

 Расположение транспарантов в пространстве таким образом, чтобы один из них попадал в поле зрения одного поста, а другой – в поле зрения второго.

2. При помощи вспомогательной камеры сделать *m* снимков обоих транспарантов с разных ракурсов. Измерить координаты точек (ИИ) транспаранта на изображении (для всех снимков).

3. Двумя камерами (пост 1 и пост 2) сделать снимки соответствующих транспарантов. Измерить пиксельные координаты точек (ИИ) транспаранта на изображениях.

4. Повторить п.1-3 *n* раз (*n* итераций).

На рис. 8 показан итерационный процесс при сборе данных для привязки пары локационных станций.



Рисунок 8. Расположение объектов при юстировке ОЭЛС

А, В, С, ... - итерации,

- 1, 2 транспаранты;
- 3, 4 юстируемая пара камер;

5 – связующая камера.

Получаем общую систему уравнений.

В операторной форме система имеет вид:

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{5,1} = C_5 M_{51}^{i,j} \tilde{X}_k 
\tilde{p}_{i,j,k}^{5,2} = C_5 M_{51}^{i,j} M_{12}^i \tilde{X}_k ,$$

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{3,1} = C_3 M_{34} M_{41}^i \tilde{X}_k 
\tilde{p}_{i,j,k}^{4,2} = C_4 M_{41}^i M_{12}^i \tilde{X}_k$$
(5)

где:

*C*<sub>5</sub>, *C*<sub>3</sub>, *C*<sub>4</sub> - операторы дисторсии для вспомогательной камеры и пары постов;

 $M_{34}$  - оператор перехода между СК поста 1 и СК поста 2;

 $M_{51}^{i,j}$  - оператор перехода между СК связующей камеры и СК транспаранта 1;

 $M_{12}^{i}$  - оператор перехода между СК транспарантов;

 $M_{41}^{i}$  - оператор перехода между СК ОАР 2 и СК транспаранта 1;

 $\tilde{p}$  - координаты точек транспарантов на изображении;

 $X_k$  - однородные координаты k -ой точки транспаранта относительно своей СК;

i = 1, n, n - число положений транспарантов друг относительно друга;

j = 1, m, m - количество снимков вспомогательной камерой;

 $k = 1, N_p$ ,  $N_p$  - количество ИИ на одном транспаранте.

Количество уравнений в системе (5) равно  $4nmN_p + 4nN_p$ , количество неизвестных 6nm+12n+6.

Полученная система уравнений решается методом Левенберга-Марквардта. В качестве начального приближения берется решение линейной системы уравнений [4]. В итоге получаем коэффициенты матрицы перехода от одного поста к другому. И таким образом, можно привязать все посты к какому либо одному, заранее выбранному посту (камере) на ЛА.

Точность данного метода зависит от количества итераций (см. рис. 8) и количества снимков связующей камерой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена оптико-электронная локационная система сферического обзора. Приведено краткое описание принципа действия этой системы, указано её расположение на летательном аппарате. Разработаны геодезический метод юстировки ЛС на борту летательного аппарата и метод юстировки с использованием вспомогательной камеры. Разработан алгоритм нахождения правил перехода между различными системами координат (ССК, СКТ, СК ЛС). Методом стохастического моделирования получена оценка погрешностей.

Список литературы.

1. *Роджерс Д., Адамс Дж*. Математические основы машинной графики. - М.: Мир, 2001. - 604 с.

2. *Воеводин В.В.* Вычислительные основы линейной алгебры. – М.: Наука, 1977. – 307 с.

3. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория вероятностей. Математическая статистика. – М.: «Гардарика», 1998. – 327 с.

4. *Wang X., Wu K., Y.* Cheng. Research on Virtual 3D Station based on Images // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2013. – Vol. 7, No. 1L.

# УВЕЛИЧЕНИЕ УГЛОВ ПОЛЯ ЗРЕНИЯ СОСТАВНОЙ ВЕБ-КАМЕРЫ МЕТОДОМ СКЛЕИВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

## ШИРОКОВ Р.И., АЛЕХНОВИЧ В.И.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: m.scofield@mail.ru

Разработан новый метод привязки постов (камер) в системе наблюдения (кругового обзора) при помощи связующей камеры (фотокамера с высоким разрешением) и пары транспарантов. Приведены основные этапы привязки пары постов системы наблюдения. Описан алгоритм формирования панорамного изображения на гранях куба. Показана сшивка изображений на примере двух веб камер с разрешением 320×240 точек. Проведена оценка точности сшивки изображений.

**Ключевые слова:** Система наблюдения, панорамное изображение, сшивка изображений, привязка, матрица перехода.

## введение

В системах наблюдения часто требуется увеличить поле зрения или, более того, построить панорамное изображение (например, в системах кругового обзора). В данном случае для увеличения углов поля зрения системы наблюдения предлагается использовать сшивку изображений с нескольких камер.

Нашей основной целью является сшивка изображений с соседних постов (камер) системы наблюдения и формирование панорамного изображения на поверхности куба. Для этого необходимо реализовать попарную привязку соседних камер, привязать все камеры к одной – базовой камере, спроецировать полученные изображения на грани куба.

Изображения с большим углом обзора можно получить различными способами. Например, с помощью широкоугольных объективов типа «рыбий глаз» [1], у которых угол обзора составляет около 180°, панорамных катадиоптрических систем, в основе которых лежит зеркало сферической или другой формы [2], позволяющее получить изображение с углами обзора до 360° по горизонтали. Основной недостаток подобных оптических устройств: невысокое и неравномерное разрешение итоговой панорамы. По этим причинам широкое распространение получили методы формирования панорамы из нескольких перекрывающихся изображений, полученных камерой, вращающейся вокруг оптического центра объектива [3], или полученных системой из множества камер.

Современные методики сшивки фотоснимков основываются на переходе к сокращённому описанию, то есть сведению изображений с многомиллионным числом параметров (цвета пикселей) к набору параметров (примитивов), число которых на несколько порядков меньше. В качестве таких примитивов могут использоваться разреженные точки изображений, контуры, простейшие геометрические фигуры, обладающие особыми свойствами, которые обеспечивают максимальную узнаваемость на других изображениях. Наилучшими характеристиками в данной задаче обладает метод описания изображения при помощи точек интереса: как правило, это точки экстремума яркости изображения. Найденные точки в последствии потребуются для сопоставления точек на разных фотографиях при помощи специальных структур, описывающих их. На данный момент можно выделить два наиболее эффективных алгоритма поиска точек интереса и построения дескрипторов: SIFT и SURF.

Точки, которые находятся с помощью метода SIFT, устойчивы к растяжению, повороту изображения и частично к изменению точки наблюдения. Для стандартных изображений получается большое число точек, описания которых значительно отличаются, что делает возможным поиск по большой базе точек.

SIFT (Scale Invariant Feature Transform) — метод поиска точек интереса, предложенный Давидом Лоу [4, 5]. Основной алгоритм можно разделить на четыре этапа:

1. Нахождение экстремумов по всем шкалам и точкам изображений. Реализуется путём вычисления разности Гауссовых функций, что позволяет находить потенциально интересные точки, которые инвариантны по отношению к растяжению и поворотам.

2. Локализация ключевых точек. В каждой точке, найденной в п.1, строится детализированная модель для уточнения положения ключевой точки и её размера.

3. Добавление ориентации. Одна или несколько ориентаций добавляются к каждой точке на основании направлений градиентов. В дальнейшем все операции производятся над полученным положением, размером и ориентациями точки. Это позволяет получить устойчивость к поворотам и растяжениям изображения.

4. Дескрипторы ключевых точек. Локальные градиенты изображения измеряются по выбранной шкале в районе каждой ключевой точки. Эти данные преобразуются к виду, допускающему значительную степень изменения формы и изменения освещения. Для каждой ключевой точки строится дескриптор размером в 64 (или 128) вещественных чисел. SURF (Speed Up Robust Feature) — детектор точек, предложенный Х. Бэйем. В некоторой степени он использует идеи, применённые в методе SIFT. В то же время, стандартная версия SURF в несколько раз быстрее, чем SIFT [6, 7].

Метод ищет особые точки с помощью матрицы Гессе. Гессиан функции – симметрическая квадратичная форма, описывающая поведение функции во втором порядке. Матрица этой квадратичной формы образована вторыми частными производными функции. Определитель матрицы Гессе называется определителем Гессе или гессианом. Если все производные существуют, то детерминант матрицы Гессе достигает экстремума в точках максимального изменения градиента яркости. Он хорошо детектирует пятна, углы и края линий. Гессиан инвариантен относительно вращения. Для каждой ключевой точки считается направление максимального изменения яркости (градиент) и масштаб, взятый из масштабного коэффициента матрицы Гессе.

Градиент в точке вычисляется с помощью фильтров Хаара. После нахождения ключевых точек, SURF формирует их дескрипторы. Дескриптор представляет собой набор из 64 (либо 128) чисел для каждой ключевой точки. Эти числа отображают флуктуации градиента вокруг ключевой точки. Поскольку ключевая точка представляет собой максимум гессиана, то это гарантирует, что в окрестности точки должны быть участки с разными градиентами. Таким образом, обеспечивается дисперсия (различие) дескрипторов для разных ключевых точек.

В данной работе предложен подход, позволяющий сшить изображения полученных с пары камер, или с п-го количества камер (и вместе с тем связать системы координат камер), без использования каких-либо характерных точек (областей), а с использованием вспомогательной системы координат (связанной с вспомогательной камерой), что позволяет сшивать изображения (формировать панорамное изображение) с минимальными перекрытиями.

## 1. Привязка соседних постов (камер)

Привязка всех постов делается попарно. Для этого используются два транспаранта (рис. 1), которые представляют собой плоские поверхности, с размещёнными на них *N*<sub>п</sub> источниками излучения (ИИ) (рис. 2). Координаты ИИ относительно СК транспаранта известны. При этом, ориентация одного транспаранта относительно другого (матрица перехода из СК транспаранта 1 в СК транспаранта 2) определяется при помощью вспомогательной системы координат. В качестве такой системы координат используется система координат, связанная с камерой (широкоугольная камера с высоким разрешением): начало координат - точка пересечения главной оптической оси и матрицы камеры, ось Z направлена по главной оптической оси в пространство предметов, ось Х и ось У располагаются в плоскости изображения и образуют с осью Z правую тройку векторов.

Алгоритм привязка пары камер состоит из следующих этапов:

1. Расположение транспарантов в пространстве таким образом, чтобы один из них попадал в поле зрения одного поста, а другой – в поле зрения второго.

2. При помощи вспомогательной камеры сделать *m* снимков обоих транспарантов с разных ракурсов. Измерить координаты точек (ИИ) транспаранта на изображении (для всех снимков).

3. Двумя камерами (пост 1 и пост 2) сделать снимки соответствующих транспарантов. Измерить пиксельные координаты точек (ИИ) транспаранта на изображениях.

4. Повторить п.1-3 *п* раз (*п* итераций).

На рис. 3 показан итерационный процесс при сборе данных для привязки пары камер.

Связь камеры 5 с транспарантами 1 и 2 даёт следующие уравнения связи ИИ на транспаранте с их изображениями:

$$\begin{split} \tilde{p}_{i,j,k}^{5,1} &= C_5 M_{51}^{i,j} \tilde{X}_k \\ \tilde{p}_{i,j,k}^{5,2} &= C_5 M_{51}^{i,j} M_{12}^i \tilde{X}_k \end{split} , \end{split}$$

где

*C*<sub>5</sub> - матрица, учитывающая дисторсию для вспомогательной камеры;

 $M_{51}^{i,j}$  - оператор перехода между СК связующей камеры и СК транспаранта 1;

 $M_{12}^{'}$  - оператор перехода между СК транспарантов;

 $X_k$  - однородные координаты k -ой точки транспаранта относительно своей СК;

 $\tilde{p}$  - координаты точек транспарантов 1 и 2 на изображении (связующей камеры 5);

i = 1, n, n - число положений транспарантов друг относительно друга;

j = 1, m, *m* - количество снимков вспомогательной камерой;

 $k = 1, N_p$ ,  $N_p$  - количество ИИ на одном транспаранте.



Рисунок 1. Принципиальная схема расположения транспарантов для взаимной привязки пары постов



Концептуальная схема транспаранта

Связь камер 3 и 4 с транспарантами 1 и 2 даёт следующие уравнения связи ИИ на транспаранте с их изображениями

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{3,1} = C_3 M_{34} M_{41}^i \tilde{X}_k ,$$

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{4,2} = C_4 M_{41}^i M_{12}^i \tilde{X}_k ,$$
(2)

где:

 $C_3, C_4$  - матрицы, учитывающие параметры дисторсии для пары связываемых камер;

 $M_{_{\rm 34}}$ - матрица перехода между СК поста <br/>l и СК поста 2;

 $M_{41}^{i}$ - матрица перехода между СК поста 2 и СК транспаранта 1;

 $\tilde{p}$  - координаты точек транспарантов 1 и 2 на изображении (связываемых камер 3, 4). 5. Получаем общую систему уравнений из (1) и (2)

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{5,1} = C_5 M_{51}^{i,j} \tilde{X}_k$$

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{5,2} = C_5 M_{51}^{i,j} M_{12}^i \tilde{X}_k \qquad (3)$$

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{3,1} = C_3 M_{34} M_{41}^i \tilde{X}_k$$

$$\tilde{p}_{i,j,k}^{4,2} = C_4 M_{41}^i M_{12}^i \tilde{X}_k$$

Количество уравнений в системе (3) равно  $4nmN_p + 4nN_p$ , количество неизвестных 6nm+12n+6. Полученная система уравнений решается методом Левенберга-Марквардта. В качестве начального приближения берется решение линейной системы уравнений [8].

# 2. Алгоритм формирования панорамного изображения

Имеется шесть граней куба, который расположен в гиростабилизированной системе координат. Матрицы ориентаций граней куба:



Первый пост установлен на каком-либо выбранном объекте (здание, автомобиль и т.д.) с разворотом на матрицу  $P_{cmp}$ , остальные посты повернуты относительного него на матрицы  $R_{il}$ . Итоговая матрица поворота *i*-го поста в ГСК:

$$M_i = P_{cmp} R_{il} R$$

Описание алгоритма:

1. Выбор грани куба.

2. Выбор точки на грани куба с координатами  $P_k = (x_k, y_k)^T$ .

3. Центрирование и масштабирование полученных координат:

$$X_{n} = \begin{pmatrix} x_{n} \\ y_{n} \\ 1 \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} x_{k} \\ y_{k} \\ 1 \end{pmatrix},$$
  
где  $K = \begin{pmatrix} f_{x} & 0 & c_{x} \\ 0 & f_{y} & c_{y} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$  параметры

 $f_x, f_y, c_x, c_y$  выбираются исходя из заданного разрешения граней куба.

Поворот вектора  $X_n^1 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M_i X_n^0$ ,  $i = \overline{1, 6}$ ,

и его последующая нормировка  $X_n = \begin{pmatrix} x/z \\ y/z \\ 1 \end{pmatrix}$ 

при выполнении условия, иначе точка в кадр не попадает.

4. Внесение дисторсии

$$X_{d} = \begin{pmatrix} x_{d} \\ y_{d} \end{pmatrix} = (1 + k_{1}a + k_{2}a^{2})X_{n}$$
  
где  $a = \arctan\left(\sqrt{x_{n}^{2} + y_{n}^{2}}\right)$ 

5. Переход в СК кадра поста:

$$X_{p} = \begin{pmatrix} x_{p} \\ y_{p} \\ 1 \end{pmatrix} = K_{calib} \begin{pmatrix} x_{d} \\ y_{d} \\ 1 \end{pmatrix}$$

где

$$K_{calib} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

 $f_x$  и  $f_y$  – горизонтальная и вертикальная составляющие фокусного расстояния камеры (поста),  $c_x$ ,  $c_y$  – координаты оптической оси объектива в системе координат матрицы.

6. Проверка условия попадания точки (на выбранной грани куба) в кадр.

7. Билинейная интерполяция яркости полученной точки по четырём соседним пикселям кадра.

## 3. Пример сшивки изображений

В качестве примера рассмотрим сшивку изображений, полученных с двух веб камер (рис. 4, 5) с разрешением 320×240 точек. Поле зрения каждой камеры составляет 55° по горизонтали и 40° по вертикали. Расположены камеры будут таким образом, чтобы область пересечения их полей составляло порядка 30° по горизонту.

Для расчета коэффициентов матрицы перехода между системами координат камер было проведено 7 итераций по 8 снимков связующей камерой в каждой (см. п.1). Результат сшивки изображений и его проекция на грань куба приведены на рис. 6.



Рисунок 4. Изображение с камеры 1



Рисунок 5. Изображение с камеры 2

Изображения сшились с погрешностью порядка одного пикселя как по горизонтали так и по вертикали. Для увеличения точности сшивки изображений необходимо увеличить количество итераций при сборе данных для расчета (см. п.1). В данном примере оптимальным будет 10 итераций по 8 снимков связующей камерой в каждой.



Рисунок 6. Сшивка изображений. Формирование панорамного изображения

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый алгоритм привязки камер для дальнейшего формирования панорамного изображения, основанный на использовании связующей камеры. Указанный алгоритм может быть использован даже в случае отсутствия пересечения полей обзора камер. Данный подход может использоваться при юстировке многокомпонентной системы сферического обзора.

# Список литературы:

1. *Wang X., Wu K., Y. Cheng.* Research on Virtual 3D Station based on Images // Applied Mathematics & Information Sciences. – 2013. – Vol. 7, No. 1L.

2. Folded catadioptric panoramic lens with an equidistance projection scheme / *Gyeong Kweon, Kwang Taek Kim, Geon-Hee Kim et al.* // Applied Optics. – 2005. – Vol. 44.

3. *Szeliski Richard*. Image alignment and stitching: a tutorial // Found. Trends. Comput. Graph. Vis. – 2006. – Vol. 2, no. 1.

4. *D. Lowe.* Distinctive Image features from scale invariant keypoints, International journal of Computer Vision, Vol. 60, pp. 91-110, 2004.

5. *Lowe, D.G.* 1999. Object recognition from local scale-invariant features. In International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece, pp. 1150-1157.

6. *Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool.* SURF: Speeded Up Robust Features, Computer Vision and Image Understanding (CVIU), Vol. 110, No. 3, pp. 346-359, 2008.

7. *N. Khan, B. McCane, G. Wyvill.* SIFT and SURF Performance Evaluation Against Various Image Deformations on Benchmark Dataset. International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, 2011.

8. *Z. Zhang*. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330–1334, 2000.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПУСКАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ

## ОСИПОВИЧ И.Р.

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

## E-mail: igro@zenit-kmz.ru

Предложен способ определения интегрального коэффициента пропускания объективов по дискретным значениям, полученным для отдельных длин волн. Это удобно при производственном контроле объективов тепловизионных систем, когда изготовление необходимых светофильтров затруднено, а иногда невозможно.

Ключевые слова: объектив, коэффициент пропускания, спектральная характеристика.

Тепловизионные системы в настоящее время стали неотъемлемой частью прицельнонавигационных комплексов самолетов, вертолетов, а также бронетанковой техники. Все большее применение находят тепловизионные системы и в других областях: охранные системы, медицинская аппаратура, системы наружного наблюдения, аппаратура метеорологических спутников. Становится очевидной тенденция роста доли таких систем в номенклатуре продукции предприятий.

Для обеспечения высоких энергетических параметров тепловизионных приборов, напрямую влияющих на дальность их применения, важной задачей становится обеспечение максимально возможного коэффициента пропускания применяемых в них объективов, на который влияют не только используемые оптические материалы, но и, в очень значительной мере, состав и качество наносимых покрытий.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Контроль коэффициента пропускания объективов тепловизионных систем является более сложной задачей, чем в видимом или ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах [1, 2]. Если в видимой или ближней ИК области спектра рабочий диапазон легко может быть выделен набором светофильтров или специ-

ально изготовленными полосовыми фильтрами, то в области спектра объективов тепловизионных систем (наиболее употребительны 3-5 мкм и 8-12 мкм) это является проблематичным, более сложным технологически, и доступным не каждому предприятию. К тому же здесь ограничен и более специфичен выбор материалов. Поэтому в условиях производства контроль пропускания тепловизионных объективов осуществляется на отдельных длинах волн, выделяемых при помощи монохроматора, являющегося частью контрольного оборудования. На выходе мы имеем набор отдельных значений коэффициентов пропускания для выбранных длин волн  $\tau(\lambda)$ .

В тоже время для оценки качества объектива тепловизионного прибора важно знать интегральный коэффициент пропускания в рабочем спектральном диапазоне.

Если известно спектральное пропускание объектива  $\tau(\lambda)$ , то его интегральный коэффициент пропускания  $\tau$  в диапазоне длин волн  $\lambda_1 \div \lambda_2$  определяется по известной формуле [3]:

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{omu.}(\lambda) S_{omu.}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{omu.}(\lambda) S_{omu.}(\lambda) d\lambda}$$
(1)

где  $\Phi_{_{OMH.}}(\lambda)$  и  $S_{_{OMH.}}(\lambda)$  – относительные спектральная плотность потока излучения и чувствительности фотоприемника соответственно.

Данная формула является точной и позволяет однозначно учесть спектральный состав излучения и спектральную характеристику фотоприемника, с которыми работает контролируемый объектив.

Поскольку функции  $\Phi_{omn.}(\lambda)$  и  $S_{omn.}(\lambda)$ , входящие в (1) – это чаще всего экспериментально полученные зависимости (существующие в виде таблиц и графиков), определение  $\tau$  по формуле (1) требует большого объема вычислений и в условиях производства является неудобным и трудоемким, особенно в случае роста объемов выпуска или если для контроля используется неавтоматизированное оборудование.

Часто применяемое в условиях производства прямое усреднение значений  $\tau(\lambda)$  или их интегрирование без учета  $\Phi_{omn.}(\lambda)$  и  $S_{omn.}(\lambda)$ , или, по крайней мере, без учета приемника не всегда дают достоверный результат, поскольку спектральные характеристики излучения и чувствительности фотоприемника в измерительной установке и в изделии (в реальных условиях эксплуатации) могут и не совпадать.



Рисунок 1. Расчетная схема для определения интегрального пропускания

#### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Считаем, что спектральные характеристики излучения объектов в условиях эксплуатации и чувствительности фотоприемника в изделии нам известны.

Допустим, что в ходе производственного контроля объектива были получены значения коэффициентов пропускания на отдельных длинах волн  $\tau_1(\lambda)$ ,  $\tau_2(\lambda)$ ,  $\tau_3(\lambda) \dots \tau_n(\lambda)$ , где n – количество значений. Для облегчения интегрирования значения коэффициентов пропускания снимаем на длинах волн, равноотстоящих друг от друга на величину  $\Delta\lambda$ .

Фотометрический интеграл в знаменателе формулы (1) не содержит функции пропускания и может быть вычислен отдельно. Для дальнейших преобразований обозначим его  $I_0$ . Известную часть выражения в числителе формулы (1) обозначим  $k(\lambda) = \Phi_{omu.}(\lambda) S_{omu.}(\lambda)$ , тогда формула (1) примет вид

$$\tau = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{I_0} \quad . \tag{2}$$

С учетом выше сделанных допущений раскрываем интеграл в выражении (2), заменяя интегрирование суммированием при помощи метода трапеций в соответствии с расчетной схемой рис. 1:

$$\tau = \frac{1}{I_0} \left[ \frac{1}{2} (k_1 \tau_1 + k_2 \tau_2) \Delta \lambda + \frac{1}{2} (k_2 \tau_2 + k_3 \tau_3) \Delta \lambda + \frac{1}{2} (k_{n-1} \tau_{n-1} + k_n \tau_n) \Delta \lambda \right],$$

где  $k_1 \dots k_n$ ,  $\tau_1 \dots \tau_n -$  дискретные значения функций для длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ , взятые с интервалом  $\Delta \lambda$ .

Преобразовывая полученное выражение, получаем:

$$\tau = \frac{\Delta \lambda}{I_0} \left[ \frac{1}{2} k_1 \tau_1 + k_2 \tau_2 + \ldots + k_{n-1} \tau_{n-1} + \frac{1}{2} k_n \tau_n \right]$$

Другими словами, интегральный коэффициент пропускания можно выразить через дискретные отсчеты с помощью простого ряда, коэффициенты которого могут быть подготовлены заранее:

$$\tau = \sum_{i=1}^{n} \zeta_i \tau_i \tag{3}$$

где

$$\zeta_{i} = \begin{cases} \frac{k_{i} \Delta \lambda}{2I_{0}}, i = 1; n\\ \frac{k_{i} \Delta \lambda}{I_{0}}, i = 2 \dots n - 1 \end{cases}$$

Практика показывает, что  $\tau(\lambda)$ ,  $\Phi_{omn.}(\lambda)$  и  $S_{omn.}(\lambda)$ , – это обычно плавные кривые, и для задач производственного контроля достаточно обрабатывать 5-7 отсчетов  $\tau_i$ . В этом случае погрешность определения интегрального пропускания по сравнению с формулой (1) не превышает 0,005; что в абсолютном большинстве случаев достаточно.

Строго говоря, данная методика работает и для оптических систем, предназначенных для других спектральных диапазонов.

## выводы

За счет того, что трудоемкие расчеты с численным интегрированием выполняются один раз для каждого из объективов, предлагаемая методика определения интегрального коэффициента пропускания по измеренным дискретным значениям позволяет заметно упростить вычисления, сведя их в ходе производственного контроля к элементарным вычислительным операциям.

### Список литературы:

1. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения. - М.: Машиностроение, 1987. - 264 с.

2. *Курт В.И., Павлюков А.К.* Способ измерения коэффициента пропускания объективов, - Патент РФ №2422790.

3. *Г. Шрёдер, Х. Трайбер*. Техническая оптика. - М.: Техносфера, 2006 – 424 с.

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ, РАСПОЗНАВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО ДВУМ МЕТОДИКАМ

## КУЛАКОВА Н.Н., МИШИН С.В.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: SvyatoslawMishin@yandex.ru, nnkulakova@gmail.com

Одним из важнейших параметров, характеризующих тепловизионные наблюдательные системы, является дальность обнаружения, распознавания и идентификации наблюдаемых объектов. В литературе, посвященной данному вопросу, рассматриваются две возможных методики расчета этого параметра. Однако, каждая из них рассматривается в отдельности. Сравнительный анализ результатов расчетов по этим методикам не приводится. В настоящей работе проведено сравнение результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам. В первой методике используется критерий Джонсона и геометрические характеристики оптической системы. Во второй методике используется критерий Джонсона и энергетические характери-

стики оптической системы.

Анализ результатов расчетов показал целесообразность применения методики расчета по геометрическим характеристикам, т.к. она является более точной по сравнению с методикой расчета по энергетическим характеристикам.

Ключевые слова: тепловизионная система, дальность, обнаружение, распознавание, идентификация.

Одним из важнейших параметров, характеризующих тепловизионные наблюдательные системы, является дальность обнаружения, распознавания и идентификации наблюдаемых объектов. В литературе [1 – 8], посвященной данному вопросу, рассматриваются две возможных методики расчета этого параметра. Однако, каждая из них рассматривается в отдельности. Сравнительный анализ результатов расчетов по этим методикам не приводится.

Целью настоящей работы является сравнение результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам. В первой методике используется критерий Джонсона и геометрические характеристики оптической системы. Во второй методике используется критерий Джонсона и энергетические характеристики оптической системы.

## 1. ОПИСАНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для анализа методик расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации выбрана двухканальная тепловизионная наблюдательная система. Данная система предназначена для наблюдения объектов в сумерках и ночью в простых и сложных метеоусловиях, в том числе при запылении и задымлении. Эта система может быть использована в приборах, предназначенных для армии и правоохранительных органов.

Система состоит из двух оптико-электронных каналов, представленных на рисунке 1:

узкопольного и широкопольного. Каждый из каналов выполнен отдельно. Каналы должны быть установлены в едином корпусе прибора. Каждый канал включает объектив и матричное фотоприемное устройство (МФПУ), установленное в плоскости наилучшего изображения. Оба объектива – линзовые. Узкопольный канал – канал высокого разрешения. Он работает в средней ИК-области:  $\Delta \lambda = 3 - 5$  мкм. Для повышения чувствительности МФПУ предусматривается его охлаждение. Широкопольный канал работает в дальней ИК-области:  $\Delta \lambda = 8 - 11$  мкм. Охлаждение МФПУ в этом канале не производится.

Исходными данными для исследования методик расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной оптической системы являются: рабочий спектральный диапазон Δλ, относительное





отверстие объектива D/f', фокусное расстояние объектива f', тип МФПУ.

Исходные данные для канала узкого поля зрения:  $\Delta \lambda = 3...5$  мкм; D/f' = 1:4; f' = 340 мм; матрица – охлаждаемая InSb IDCA (фирма SCD) с параметрами: формат – 640x512 пик-селей, шаг – 15 мкм, размеры – 9,6x7,68 мм.

Исходные данные для канала широкого поля зрения:  $\Delta \lambda = 8...11$  мкм; D/f' = 1:1,2; f' = 170 мм; матрица – микроболометрическая UL03191 (фирма Ulis) с параметрами: формат – 384х288 пикселей, шаг – 25 мкм, размеры – 9,6х7,2 мм.

# 2. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ, РАСПОЗНАВАНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ КАНАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ ДЖОНСОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ

Процесс обнаружения и распознавания объекта зависит от ряда случайных факторов и является вероятностным. Поэтому необходим критерий, позволяющий с определенной степенью достоверности принимать решение о выполнении задачи обнаружения, распознавания и идентификации. В качестве такого критерия широко применяется критерий Джонсона [2].

Критерий Джонсона представляет собой зависимость между числом разрешаемых периодов эквивалентной миры N, укладывающихся на критическом размере наблюдаемого объекта, и вероятностью решения задач наблюдения. Критическим называется размер, вдоль которого ведется анализ изображения объекта для выявления его характерных признаков. Эквивалентной штриховой мирой называют миру прямоугольной формы, ширина которой равна критическому размеру объекта, а длина соответствует его размеру в направлении, перпендикулярном критическому. Один период эквивалентной миры содержит два штриха равной толщины – темный и светлый.

Значения числа Джонсона *N*, характеризующие решение задач обнаружения, распознавания, идентификации с вероятностью 50%, по данным [2] приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Значения числа Джонсона

Решаемая задача	N
Обнаружение	1,0
Распознавание	3,04,0
Идентификация	6,0

Пространственная частота системы v в плоскости изображения, обеспечивающая требуемое для решения задачи обнаружения или распознавания число N, может быть рассчитана по формуле (1), приведенной в [1]:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\boldsymbol{N} \boldsymbol{l}}{\boldsymbol{f}' \boldsymbol{h}_{\mathbf{sp}}} , \qquad (1)$$

где *v*, *л/мм* – пространственная частота оптической системы в плоскости изображения;

N – число периодов эквивалентной миры,
 укладывающихся в критическом размере объекта;

*l, м* – расстояние от оптической системы до наблюдаемого объекта;

*f', мм* – фокусное расстояние оптической системы;

*h*<sub>кр</sub>, *м* – критический размер наблюдаемого объекта.

Критическую пространственную частоту оптической системы в плоскости изображения можно определить, используя параметры МФПУ, по следующей формуле:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2\mathbf{a}} \quad , \tag{2}$$

где *а, мм* – размер чувствительного элемента фотоприемного устройства.

Выберем в качестве объекта наблюдения человека с ростом 1,7 м. Рост человека является критическим размером  $h_{xxx}$ .

Из формулы (1) выразим искомую величину – дальность до объекта наблюдения:

$$l = \upsilon \cdot \frac{f' \cdot h_{\varphi}}{N}$$
(3)

Используя, формулы (2), (3) и табл. 1, вычислим дальности, на которых решаются задачи наблюдения с вероятностью 50%. Результаты расчета дальностей обнаружения, распознавания, идентификации приведены в табл. 2.

Согласно расчету по формулам (2), (3), дальность обнаружения объекта с вероятностью 50% составляет для узкопольного канала 19270 м, для широкопольного – 5780 м; дальность распознавания объекта с вероятностью 50% составляет для узкопольного канала 6422 м, для широкопольного – 1927 м; дальность идентификации объекта с веро-

20	LIONUCH	iu oonupys	<i>пения, распозни</i>	вания и исептификаці	ии оовекти			
				Дальность до объекта l, м				
Оптический канал	f', мм	∪ лин/мм	Обнаружение	Распознавание (N=3)	Идентификация			
Широкого поля, $\Delta\lambda = 811$ мкм	170	20	5780	1927	963			
Узкого поля, Δλ = 35 мкм	340	33	19270	6422	3211			

Таблица 2. Дальности обнаружения, распознавания и идентификации объекта

ятностью 50% составляет для узкопольного канала 3211 м, для широкопольного – 963 м.

# 3. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ, РАСПОЗНАВАНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ КАНАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ ДЖОНСОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ

В работе [3] описана связь дальностей обнаружения, распознавания, идентификации тепловизионной системы не только с критерием Джонсона, но и с энергетическими характеристиками системы, а также с квалификацией оператора.

В практике наблюдения во многих случаях используется формула расчета дальностей до объекта, на которых решается задача наблюдения:

$$I = \frac{h_{\mu\nu}\gamma_{\mu}x}{C\delta} \sqrt{\frac{0,7}{\ln(1-P)}} , \qquad (4)$$

где  $\gamma_0$  - показатель квалификации оператора, для оператора невысокого уровня его можно принять равным 0,8;

C – критерий Джонсона, берется таким же, как в таблице 1 для вероятности 50% (то есть C = N);

*P* – вероятность решения поставленной задачи;

 $\delta$  — значение элементарного поля зрения тепловизионного прибора, которое определяется по формуле:

$$\boldsymbol{\delta} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\boldsymbol{f}^{*}} , \qquad (5)$$

где *а* – размер чувствительного элемента фотоприемного устройства;

*f*' – фокусное расстояние оптической системы;

*х* – коэффициент, учитывающий энергетические характеристики системы, приближенно определяется формулами (6) и (7):

где  $\Delta T_R$  – разность радиационных температур объекта и фона, для человека в качестве объекта наблюдения и типичных фонов обычно принимается  $\Delta T_R = 5...10K$ ,

 $\tau_a$ - коэффициент пропускания атмосферы, примем его равным 0,5;

b - число элементов МФПУ, на которое укладывается заданное число периодов эквивалентной миры, b = 2;

 $\Delta T$  – разность температур, эквивалентная шуму, указана в паспорте МФПУ.

Согласно паспортным характеристикам, МФПУ канала узкого поля зрения имеет  $\Delta T = 0,02K$ , а МФПУ канала широкого поля зрения  $\Delta T = 0,1K$ .

Используя в качестве объекта наблюдения человеческую фигуру, вычислим по формулам (4) – (7) дальности, на которых решаются задачи наблюдения с вероятностью 50%. Результаты вычислений дальностей обнаружения, распознавания и идентификации приведены в табл. 3.

		Дальность до объекта l, м				
Оптический канал	f', ММ	Обнаружение (C=N=1)	Распознавание (C=N=3)	Идентификация (C=N=6)		
Широкого поля, Δλ = 811 мкм	170	6664	2221	1111		
Узкого поля, Δλ = 35 мкм	340	23230	7745	3872		

	Таблица 3.		
Дальности обнаружения,	распознавания и	і идентификации	объекта

Согласно расчету по формулам (4) – (7) при выбранных типах матриц и при выбранном типе объекта дальность обнаружения с вероятностью 50% составляет для узкопольного канала 23320 м, для широкопольного – 6664 м; дальность распознавания объекта с вероятностью 50% составляет для узкопольного канала 7745 м, для широкопольного – 2221 м; дальность идентификации объекта с вероятностью 50% составляет для узкопольного канала 3872 м, для широкопольного – 1111 м.

# 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ДАЛЬНО-СТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ, РАСПОЗНАВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО ДВУМ МЕТОДАМ

Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации по двум методикам показал, что значения этого параметра, рассчитанные по методике с использованием энергетических характеристик, превышают на 15 – 20% значения, рассчитанные по методике с использованием геометрических характеристик. Известно, что достоверность результатов расчета по последней методике неоднократно подтверждена экспериментальными исследованиями. Отсюда следует вывод о предпочтительности применения методики расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации по критерию Джонсона с использованием геометрических характеристик.

# Список литературы:

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. — М.: Мир, 1988. — 452 с., ил.

2. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 452 с.

3. Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Метод оптимизации несканирующих

тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2012. Т. 79, №3. С. 4 – 10.

4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009-238 с.

5. *Будадин, Вавилов В.П., Абрамова Е.В.* Тепловой контроль М.: ИД Спектр, 2011-230с.

6. Вавилов В.П., Климов А.Г. Тепловизоры и их применение. М.: Интел универсал, 2002-290с.

7. Козёлкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. М.: Машиностроение, 1974-336 с.

8. Справочник по инфракрасной технике. / Ред. У. Вольф, Г. Цисис. В 4-х тт. Т. 4. Проектирование инфракрасных систем: Пер. с англ. – М.: «Мир», 1999. – 472 с., ил.

# References

1. Gossorg Zh. Infrakrasnaia termografiia. Osnovy, tekhnika, primenenie: Per. s frants. — M.: Mir, 1988. — 452 s., il.

2. *Tarasov V.V., Iakushenkov U.G.* Infrakrasnye sistemy «smotriashchego» tipa. M.: Logos, 2004. 452 s.

3. *Ivanov V.P., Ovsiannikov V.A., Filippov V.L.* Metod optimizatsii neskaniruiushchikh teplovizionnykh priborov // Opticheskiĭ zhurnal. 2012. T. 79, №3. S. 4 – 10.

4. *Vavilov V.P.* Infrakrasnaia termografiia i teplovoi kontrol'. M.: ID Spektr, 2009-238 c.

5. *Budadin, Vavilov V.P., Abramova E.V.* Teplovoi kontrol M.: ID Spektr, 2011-230c.

6. *Vavilov V.P., Klimov A.G.* Teplovizory i ikh primenenie. M.: Intel universal, 2002-290c.

7. *Kozelkin V.V., Usoltsev I.F.* Osnovy infrakrasnoĭ tekhniki. M.: Mashinostroenie, 1974-336 s.

8. Spravochnik po infrakrasnoi tekhnike. / Red. U. Volf, G. Tsisis. V 4-kh tt. T. 4. Proektirovanie infrakrasnykh sistem: Per. s angl. – M.: «Mir», 1999. – 472 s., il.

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

# К ВОПРОСУ ЦЕНТРИРОВАНИЯ ЛИНЗ КОЛЬЦЕВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

ВАСИЛЬЕВА С.Н., ГРИМАЛЮК М.В., ЛОМАКИН Ю.В., ПОДОБРЯНСКИЙ А.В.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

E-mail: optica@npooptica.ru

В статье рассмотрены вопросы особенности технологического процесса центрирования линз кольцевым алмазным инструментом разных фракций, результаты исследований технологического процесса, определены оптимальные режимы обработки, приведены преимущества метода центрирования кольцевым алмазным инструментом по сравнению с существующим классическим способом центрирования периферией алмазного круга плоского профиля типа 1А1.

**Ключевые слова:** центрирование, микрооптика, кругление, кольцевой алмазный инструмент, фракция, алмазоносный слой, правка, угол сжатия, сфера, балансирование.

Одной из заключительных операций обработки линз является операция центрирования, на которой происходит совмещение оптической и геометрической осей линзы за счет снятия припуска по диаметру оптической детали (ОД) и устранение косины (разнотолщинности линз по краю), получаемой на предыдущих операциях обработки ОД (сферошлифование и полирование).

До настоящего времени основная номенклатура линз диаметром от 4 до 100÷120 мм, составляющая до 95÷98% от общей номенклатуры оптических деталей, центрируется по существующей «классической» технологии [1] на станках с горизонтальным или вертикальным расположением шпинделей алмазным дисковым инструментом прямого профиля (типа 1А1).

Операция центрирования проводится в оптических отечественных производствах, в основном, на физически и морально устаревших станках типа ЦС или немецких станках мод. LZ фирмы LOH (Германия) [2] и обеспечивается точность центрирования 0,01÷0,02 мм, предельное отклонение диаметра – 8 квалитет по ГОСТ 25347-82, шероховатость обработанной цилиндрической поверхности  $R_a \le 1,6$  мкм, что не удовлетворяет современным требованиям.

Недостатками данной технологии и оборудования, на которых производится операция центрирования, являются:

- обязательное применение в качестве СОЖ вазелинового (машинного) масла (наличие «масляного тумана»), что делает процесс экологически вредным;

- большой удельный вес (около 50%) ручных вспомогательных операций.

Кроме того, в производственной практике при центрировании осциллирующим движением инструмента вдоль вращающейся оптической детали часто на кромках центрируемой поверхности образуются недопустимые по величине сколы из-за несоответствия режима осцилляции оптимальным условиям резания. Отказ от осцилляционного движения приводит к неравномерному износу алмазного круга и, как следствие, к необходимости периодической его правки на электроэрозионном станке, т.е. к повышенному расходу алмазного слоя инструмента.

Как показывает опыт эксплуатации отечественного центрировочного оборудования, при работе используется от 50% до 60% алмазосодержащего слоя инструмента.

Еще одним из недостатков «классического» способа центрирования в самоцентрирующих патронах является ограничение номенклатуры центрируемых линз величиной угла сжатия α<sub>сж</sub> ≥ 17°.

Кроме того, при таком способе центрирования форма поверхности из-за погрешностей станка и профиля инструмента очень часто приобретает конусность или даже клиновидность, что не всегда можно исправить обязательным введением последующей операции фасетирования. Это осложняет последующий процесс сборки оптических узлов из набора подобных ОД.

В ООО «НПО «Оптика» был разработан и опробован новый способ центрирования линз – способ центрирования кольцевым алмазным инструментом (КАИ), на который получен патент на изобретение [3].

Сущность метода заключается в следующем (рис. 1). Заготовка линзы поз. 1 с окончательно обработанными первой I и второй II исполнительными сферическими поверхностями базируется и зажимается в центрировочных патронах поз. 2 центрировочного станка, обеспечивающих совмещение оптической оси линзы с осью вращения шпинделя изделия станка.

Формообразование поверхности кромки поз. 3 линзы осуществляется за счет вращения ( $B_2$ ) линзы поз. 1 и ( $B_1$ ) кольцевого алмазного инструмента (КАИ) поз. 4 при его осевой подаче  $\Pi_1$ . Ось вращения КАИ устанавливается перпендикулярно к оси вращения обрабатываемой линзы (оси шпинделей изделия центрировочного станка) и обе оси находятся в одной плоскости, при этом ось вращения КАИ должна располагаться симметрично относительно образующей центрируемой поверхности и проходила через центр О описанной вокруг обрабатываемой линзы сферы.

В результате такого способа центрирования поверхность линзы принимает форму шарового пояса («бочки») с центром О сферической поверхности диаметром, равным диаметру линзы  $D_o$ . При этом диаметр кромок линзы  $D_{\kappa}$ , образующийся в результате пересечения сферических поверхностей (исполнительных I и II и торцевой 3), имеет бо́льшие значения, чем световые диаметры  $D_c$  линзы, т.е. соблюдается условие

$$D_{\kappa} > D_{c}$$
, где  $D_{c} = D_{o} - (0, 5...1, 0)$ .



Рисунок 1. Схема центрирования линз кольцевым алмазным инструментом

Для использования способа центрирования КАИ был разработан, изготовлен и прошел технологические испытания опытный образец станка мод. СЦ-100К с горизонтальным расположением оси вращения центрировочных патронов.

Кинематика станка предусматривает следующие движения исполнительных органов:

- вращение шпинделя инструмента со скоростью до 333 С<sup>-1</sup> (20000 об/мин);

- синхронное вращение шпинделей изделия правого и левого со скоростью от 1,7 до 10 С<sup>-1</sup> (от 100 до 600 об/мин);

- осевое перемещение шпинделя инструмента со скоростью от 8,3 10<sup>-6</sup> до 1,7 × 10<sup>-4</sup> С<sup>-1</sup> (от 0,5 до 10 мм/мин);

- горизонтальное установочное перемещение шпинделя инструмента;

- осевое перемещение пиноли (патрона) правой шпиндельной бабки, необходимое для зажима ОД между центрировочными патронами.

## ЦИКЛ РАБОТЫ СТАНКА

Линза устанавливается между самоцентрирующими патронами и зажимается с необходимой силой зажима. После включения станка нажатием кнопки «пуск цикла» осуществляется центрирование (кругление) линзы в цикле: быстрый подвод – рабочая подача и выхаживание.

После окончания обработки шлифовальная бабка с инструментом возвращается в исходное положение.

# КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕТАЛЕЙ-ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ

Для проведения исследований были выбраны три детали-представители, охватывающие по величине диаметра диапазон микрооптики от 3 до 15 мм. Характеристики деталей-представителей приведены в табл. 1.

	Конструкторско-технологические параметры деталей-представителей								
Обозначение детали	Марка стекла	Наружный диаметр, мм	Радиус сферы I пов., мм	Радиус сферы II пов., мм	Толщина t, ∆t, мм	Толщина по краю L, мм	Световой диаметр, мм	Децен- тричность, мм	Класс чистоты
Дет. №1	СТК 19	3,4 <sup>-0,01</sup> -0,05	×	+8,67	1,2±0,03	0,925	2,6	0,02	6
Дет. №2	ТФ 10	14,2 <sup>0,025</sup> 0,075	-14,645	+10,11	1,0±0,05	3,72	13,2	0,02	6
Дет. №3	СТК 9	$6,5 \begin{array}{c} -0,01 \\ -0,05 \end{array}$	-63,30	+10.596	1,75±0,02	2,25	5,6	0,02	6

Таблица 1.

Таблица 2.

Характеристики алмазных колец

Номер ОД	d <sub>вн</sub> /d <sub>нар</sub> , ММ	Алмазный порошок мкм	Концентрация К,%	Кол-во, шт.	Посадочный диаметр державки под кольцо D вн., мм
Her Mal	1,1/3,0	AC20 50/40	25	2	1.1
дет. №1		ACM 40/28	25	2	1,1
Пот №2	4,0/6,0	AC20 50/40	25	2	4.0
Дет. №2		ACM 40/28	25	2	4,0
Дет. №3	25/50	AC20 50/40	25	2	2.5
	2,5/5,0	ACM 40/28	25	2	2,5



алмазного инструмента

На рис. 2 приведен пример конструкции кольцевого алмазного инструмента, где поз. 2 – державка, поз. 1 – алмазное кольцо. Конструктивные параметры кольцевого алмазного инструмента (КАИ) зависят от параметров центрируемой линзы.

Оптимальные размеры и характеристики алмазного кольца для деталей, приведенных в табл. 2, следующие:

– ширина режущей кромки кольца от 1,0 до 2,0 мм;

- высота кольца от 5 до 8 мм;

внутренний диаметр КАИ (d<sub>вн</sub>) должен
 быть на величину от 0,2 до 0,4 мм больше
 толщины края линзы;

- характеристика алмазоносного слоя:

a) алмазный порошок AC-20 50/40 или ACM 40/28 в зависимости от требуемой по чертежу шероховатости;

б) концентрация К - 25 %.

На каждую деталь было подготовлено по два комплекта алмазных колец с различными характеристиками согласно табл. 2.

Для линз микрооптики с толщиной по краю менее 2 мм для изготовления алмазных колец была разработана упрощенная технология их изготовления без применения прессформ для прессования колец и проведено динамическое балансирование КАИ на специальном балансированном станке мод. СБ-70 (собственная разработка) по 2-му классу точности (ГОСТ 22061).

По этой технологии были изготовлены КАИ для деталей № 1 и № 3

Отличительной особенностью центрирования КАИ является то, что корпуса центрировочных патронов не должны выходить за пределы окружности, описанной вокруг диаметра линзы  $D_0$  в зоне вращения кольцевого инструмента (рис. 3).

Эта особенность несколько усложняет конструкцию центрировочных патронов, его «затылочную» часть, которая приобретает сложный профиль. Эта особенность может, в конечном итоге, оказаться препятствием для центрирования линз микрооптики малого диаметра.

Таким образом, при конструировании центрировочных патронов необходимо соблюсти два условия:

 диаметры базирующих кромок КАИ не должны быть меньше светового диаметра сферических поверхностей линзы;



Рисунок 3. Схема центрирования КАИ и особенность его конструкции

- наружный контур корпуса центрировочного патрона не должен пересекать траекторию вращения КАИ.

Для линз микрооптики диаметр патрона определяется из соотношения  $D_n > D_c$ , где  $D_c$  равняется от 0,8 до 1,0  $D_o$  (рис. 1).

Смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), применяемая при исследовании процесса центрирования КАИ.

При исследовании применялась экологически безопасная СОЖ: водный раствор 3% глицерина и 0,2% магнасульфаната.

Известно, что при центрировании линз классическим способом кругом типа 1А1 применяется дорогостоящее вазелиновое масло марки МВП, которое является экологически вредным веществом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании был проведен анализ возможности центрирования КАИ исходя из условия обеспечения зажима линз в самоцентрирующих патронах, т.е. соблюдение условия  $D_{\kappa} > D_{c}$  (рис. 1),

где:  $D_{\kappa} = D_0 - 2h;$ 

h – стрелка прогиба шарового пояса (профиля кромки линзы)

$$h = \frac{D_0}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}$$
(1)

Так как для линз микрооптики отношение  $L/D_0$  может быть близким и даже большим 1, то такой анализ просто необходим.

В табл. 3 приведены расчетные значения величины h в зависимости от диаметра линзы D<sub>0</sub> и толщины кромки линзы L.

Исходя из условия, что для линз микрооптики  $D_c = D_0 - (0, 4...0, 5)$ , в табл. 3 выделена зона значений h≥0,4+0,1, при которых центрирование линз кольцевым алмазным инструментом невозможно, так как при этом  $D_k > D_c$  (нижняя зона под линией разграничения). Удельный вес линз с диаметром более 3 мм, у которых  $D_k > D_c$ , весьма незначителен.

При исследовании было определено влияние величины толщины режущей кромки КАИ на конструкцию центрировочного патрона.

Экспериментальным путем было определено, что толщина режущей кромки алмазного инструмента должна быть от 1,0 до 1,2 мм, а не от 2 до 3 мм, как это имело место при центрировании линз диаметром свыше 20 мм.

Велич	чина стрелки пр	огиба шарового	пояса («бочки»,	)
i	кромки линз ми	крооптики в ми	ллиметрах	
ина линзы	h - стр	елка прогиба шај	рового пояса («бо	чка»)
о краю	Øлинзы 3	Øлинзы 5	Øлинзы 10	Øли

Таблица 3.

Голщина линзы							
по краю	Øлинзы 3	Øлинзы 5	Øлинзы 10	Øлинзы 15			
0,5	0,021	0,013	0,007	0,005			
1,0	0,058	0,102	0,026	0,017			
1,5	0,195	0.116	0,057	0,038			
2,0	1,142	0,219	0.102	0,057			
2,5		0,336	0,159	0,105			
3,0		1,080	0,231	0,152			
3,5			0,317	0,208			
4,0			0,418	0,272			
4,5			0,536	0,346			
5,0			0,670	0,429			
5,5				0,523			
6,0							
6,5							
7,0							
7,5							

В противном случае наружная кромка инструмента (кольца) значительно уменьшает диаметр хвостовика державки 2 (рис. 2).

Из рисунка 3 видно, что при толщине кольца t<sub>2</sub> диаметр хвостовика державки d<sub>2</sub> больше, чем d<sub>2</sub> при большей толщине кольца t<sub>2</sub>, что позволяет увеличить жесткость патрона.

Так, например, для центрирования детали № 3 ( $d_0 = 6,5$  мм):

- при t<sub>1</sub> = 1,0 мм ; d<sub>1</sub> = 2,5 мм

- при t<sub>2</sub> = 2,0 мм ; d<sub>2</sub> = 5,0 мм.

Несмотря на то, что при уменьшении толщины режущей кромки КАИ износ алмазоносного слоя увеличивается, его удельный расход (износ инструмента на одну деталь) сохраняется.

определение оптимального значения величины внутреннего диаметра кольцевого алмазного инструмента

Вероятность образования сколов на кромках линзы тем меньше, чем меньше угол  $\beta_2$ между векторами линейных скоростей инструмента  $\overline{V_{k1}}$  и  $\overline{V_{k2}}$  и линейных скоростей кромки детали  $\overline{V_{q1}}$  и  $\overline{V_{q2}}$  в точках контакта формообразующей окружности КАИ с окружностью Е детали.

Из рисунка 4 видно, что  $\beta_1 > \beta_2$ ,

где  $\beta_1$  – угол между векторами  $V_{k1}$  и  $V_{q1}$  для инструмента с меньшим внутренним диаметром  $d_{gu}$ ;

 $\beta_2 -$ угол между векторами  $\overline{V_{k2}}$  и  $\overline{V_{q2}}$  для инструмента с большим внутренним диаметром d<sub>вн.2</sub>



Рисунок 4. Определение величины внутреннего диаметра КАИ

Экспериментально также подтверждено, что образование сколов и их величины на кромках линзы уменьшается с уменьшением размера внутреннего диаметра алмазного кольца  $d_{_{BH}}$  и оптимальное его значение должно превышать ширину L центрируемой поверхности линзы на величину от 0,2 до 0,3 мм, т.е.  $d_{_{BH}} = L + (0,2...0,3)$  мм;

- предельное значение угла сжатия ОД для условия обработки КАИ микрооптики в самоцентрирующих патронах.

Угол сжатия деталей – представителей составляет:

- деталь № 1 - 11°18';

- деталь № 2 - 15°54';

- деталь № 3 - 11°56'.

Сила зажима линз в самоцентрирующих патронах составила (300±10) Н, как и при центрировании «классическим» способом. Смещение линз при центрировании КАИ относительно оси вращения патронов отсутствовало, так как была обеспечена требуемая точность и качество обработки.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что способ центрирования КАИ обеспечивает возможность обработки в самоцентрирующих патронах линз микрооптики, как и линз диаметром свыше 20 мм, с углом сжатия α<sub>сж</sub> ≥ 12°;

- минимально возможное значение диаметра линзы центрируемой КАИ.

Исследование этого параметра проводилось путем обработки детали № 1.

Возможность центрирования линз КАИ диаметром менее 3 мм была опробована по схеме обработки, приведенной на рис. 5.

Из схемы видно, что КАИ с внутренним диаметром 1,2 мм имеет торцевую поверхность, перпендикулярную оси его вращения. Режущая кромка «К» размером от 0,1 до 0,2 мм получается путем притира инструмента микропорошком М40 по заготовке детали №1, установленной в центрировочных патронах. Центрировочные патроны имеют наружную цилиндрическую поверхность и внутренний конус с углом 70° при вершине. Пересечение этих поверхностей образует базирующую кромку патрона.



Рисунок 5. Схема обработки

Основные размеры инструмента и патронов приведены на рис. 5. Предел осевого перемещения инструмента с целью получения минимального диаметра определялся моментом касания КАИ патронов, после чего была проведена правка торца КАИ на величину от 0,1 до 0,2 мм. По данной схеме было отцентрировано 50 деталей № 1 до диаметра 2,2 мм с точностью и качеством обработки не хуже, чем полученные результаты на деталях-представителях (табл. 4).

Несмотря на малый размер режущей кромки, после обработки указанной партии деталей размер диаметра линзы увеличился всего на 0,022 мм при допуске 0,050 мм.

Таким образом, экспериментально установлена возможность центрирования алмазным кольцевым инструментом линз микрооптики диаметром до 2,2 мм при условии периодической правки торца инструмента через каждые 50..150 деталей в зависимости от допуска на диаметр линзы;

# - определены технологические режимы центрирования деталей-представителей.

При исследовании процесса центрирования КАИ линз микрооптики были использованы результаты технологических испытаний опытного образца станка мод. СЦ-100К - ча-стота вращения инструмента.

Учитывая, что внутренний диаметр инструмента d<sub>вн.</sub> зависит только от толщины края линзы, и по этому параметру линзы микрооптики находятся в том же диапазоне толщин, что и линзы диаметром свыше 20 мм, скорость резания и соответственно частоты вращения инструмента при исследовании были приняты те же, что и при центрировании линз свыше 20 мм.

Оптимальная скорость резания (линейная скорость инструмента), критерием которой является наличие и величина сколов на кромках линзы, составляет от 12 до 18 м/сек. Исходя из этого, для центрирования деталейпредставителей были приняты следующие частоты вращения инструмента:

- деталь № 1  $n_{u1} = 300 \text{ C}^{-1}$  (18000 об/мин.); - деталь № 2  $n_{u2} = 200 \text{ C}^{-1}$  (12000 об/мин.); - деталь № 3  $n_{u3} = 233 \text{ C}^{-1}$  (14000 об/мин.) Инструменты динамически балансировались на специальном стенде по второму клас-

су точности (ГОСТ 22061) - частота вращения детали и скорость рабочей подачи. При центрировании линз алмазным кругом

плоского профиля принято соотношение линейных скоростей инструмента  $V_{\mu\mu}$  и детали  $V_{\mu}$  $V_{\mu\mu}/V_{\mu} \ge 100.$ 

В нашем случае при таком соотношении скоростей имеем при среднем значении  $d_{_{\pi}} = 8$  мм,  $V_{_{\mu H}} = 15$  м/сек,  $V_{_{\pi}} = 0,15$  м/сек по формуле

$$n = 1000 \times 60 \quad \frac{V}{\pi D} \tag{2}$$

находим n = 360 об/мин.

Исходя из этого, определение оптимальных значений частот вращения деталей-представителей проводилось путем увеличения частоты вращения шпинделя детали, начиная с  $n_1 = 300$  об/мин. Так, например, центрирование детали № 2 проводилось при постоянной скорости подачи S= 5×10<sup>-5</sup> м/сек (3 мм/мин) с характеристикой алмазного слоя AC 20 50/40; К25% на следующих частотах вращения шпинделей:

n<sub>и</sub> = 200 С<sup>-1</sup> (12000 об/мин);

n<sub>п1</sub> = 5 С<sup>-1</sup> (300 об/мин);

n<sub>12</sub> = 6,7 С<sup>-1</sup> (400 об/мин);

n<sub>л3</sub> = 8,3 С<sup>-1</sup> (500 об/мин).

При частоте вращения детали свыше 8,3 С<sup>-1</sup> (500 об/мин) на кромках линзы стали появляться сколы размером до 0,4 мм.

Таким образом, наибольшая скорость вращения детали так же, как и максимальная скорость вращения инструмента ограничивалась критерием образования сколов на кромках линзы.

Экспериментально определено, что диапазон оптимальных скоростей вращения деталей, зависящий еще от диаметра линзы и скорости рабочей подачи инструмента, находится в пределах:

– для инструмента с фракцией AC 20 <sup>50</sup>/40
- от 6,7 до 8,7 С<sup>-1</sup> (от 400 до 520 об/мин.);

– для инструмента с фракцией ACM <sup>40</sup>/28
 - от 8 до 10 С<sup>-1</sup> (от 480 до 600 об/мин.).

- скорость рабочей подачи при этом составляет от 5  $\times 10^{-5}$  до 6,7  $\times 10^{-5}$  м/сек (от 3 до 4 мм/мин.).

На рис. 6 представлен график зависимости скорости рабочей подачи S от частоты вращения детали n<sub>"</sub> для инструментов:

AC 20 50/40 - график 1;

АСМ <sup>40</sup>/28 - график 2.

Диапазон оптимальных подач для каждого инструмента обозначен разной штриховкой.

В табл. 4 приведены данные точностных и качественных параметров отцентрированных партий деталей – представителей на оптимальных режимах.

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА НЕПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОСЕЙ ШПИНДЕЛЕЙ ДЕТАЛИ (ЦЕНТРИРОВОЧНЫХ ПАТРОНОВ) И АЛМАЗНОГО КОЛЬЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА КАЧЕСТВО ЦЕНТРИРОВАНИЯ

Непересечение осей шпинделей инструмента и изделия, расположенных под углом 90° друг к другу, отражается только на качестве обработанной поверхности, так как в этом случае КАИ работает одной кромкой, при этом исчезает «сетка» (пересекающиеся следы шлифования ОД режущей кромки инструмента) и образуются кольцевые риски тем глубже, чем больше величина непересечения.

Экспериментально определена степень влияния величины непересечения осей на качество обработанной поверхности. В станке мод. СЦ-100К имеется механизм, с помощью которого с микронной точностью перемеща-



### Рисунок 6.

График зависимости скорости рабочей подачи от частоты вращения детали для инструментов

ется шлифовальная бабка со шпинделем инструмента в вертикальном направлении для настройки непересечения осей.

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

 пробными шлифовками с помощью механизма настройки пересечения осей добивались получения однородной по фактуре «сетки». Это свидетельствовало, из опыта сферошлифования, что непересечение осей составляет ±0,003 мм;

 затем, с помощью механизма настройки пересечения осей, производилось смещение осей последовательно на 0,005, 0,010, 0,015 и 0,02 мм.

В результате, при величине непересечения осей до 0,010 мм, качество центрируемой поверхности линз не менялось (шероховатость R<sub>a</sub> от 0,8 до 1,6 мкм в зависимости от характеристики алмазного слоя, отсутствие видимых сколов).

Начиная с величины непересечения осей более 0,010 мм появляются сколы на одной из кромок линзы, количество и размер которых увеличивались по мере увеличения параметра непересечения осей.

Таким образом, экспериментально установлено: непересечение осей вращения детали и инструмента при центрировании КАИ должно быть не более ±0,01 мм.

По результатам исследования технологического процесса центрирования КАИ разработан «Базовый технологический процесс центрирования линз микрооптики кольцевым алмазным инструментом».

Результаты контроля обработанных партий деталей-представителей

Обозна- чение ОД	Номиналь- ное значение диаметра ОД, мм	Количество отцентри- рованных ОД, шт.	Алмазный кольцевой инструмент, зернистость, мкм	Отклонение диаметра в партии деталей, мм	Значение децентрич- ности С, мм	Шерохо- ватость Ra, мкм	Время обра- ботки, сек.
Деталь	3,4	200	50/40 40/28	-0,03 -0,04	0,004	1,2÷1,4 0,8÷1,0	36 42
Nº 1	2,2	50	50/40 40/28	-0,02 -0,05	0,004	1,4÷1,6 0,8÷1,2	42 48
Деталь № 2	14,2	250	50/40 40/28	-0,04 -0,05	0,005	1,4÷1,6 0,8÷1,2	36 42
Деталь № 3	6,5	250	50/40 40/28	-0,035 -0,045	0,004	1,0÷1,4 0,6÷1,8	39 42

Исследование процесса центрирования КАИ проводилось в оптической лаборатории «НПО «Оптика», находящейся в г. Валдай на территории ЗАО «Юпитер».

Там же в производственных условиях на опытном образце центрировочного станка мод. СЦ-100К, работающего кольцевым алмазным инструментом, была отцентрирована и принята ОТК партия линз микрооптики в количестве 2200 штук, в том числе:

- микролинз d<sub>0</sub> = 14,2 мм – 1000 штук;

микролинз d<sub>0</sub> = 6,5 мм – 800 штук;
микролинз d<sub>0</sub> = 3,4 мм – 400 штук.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследования техпроцесса показали возможность осуществления центрирования кольцевым алмазным инструментом в самоцентрирующих патронах гарантированно для линз диаметром от 3 мм и выше, а также с некоторыми ограничениями (периодическая правка торца инструмента) для линз с диаметром от 2,2 мм до 3 мм.

2. Технология центрирования КАИ линз имеет ряд неоспоримых преимуществ перед существующей технологией центрирования линз алмазным кругом плоского профиля:

 работа кольцевого инструмента в режиме «самозатачивания» до полного износа алмазоносного слоя;

- значительно (от 80 до 100 раз) снижается расход алмазных порошков за счет высокой стойкости КАИ:

 получение высокой гарантированной точности обработки: по диаметру линз - от 0,003 до 0,006 мм; по децентричности – от 0,005 до 0,008 мм; по некруглости – не более 0,03 мм;

- увеличивается производительность от 20 до 25%;

- высокое качество центрируемой поверхности: отсутствие видимых сколов; шероховатость R<sub>2</sub> от 0,63 до 1,2 мкм (7 класс);

- применение в качестве СОЖ технической воды с безвредными добавками вместо вазелинового масла при существующем техпроцессе переводит техпроцесс центрирования КАИ в разряд экологически безопасных;

- возможность центрирования линз с углом сжатия а<sub>сж</sub> ≥12° (при существующем α<sub>cж</sub>≥17°);

 получение профиля торцевой поверхности линз в виде «бочки» дает возможность исключить операцию обработки технологических фасок (фасетирования) и применить «насыпной» метод сборки оптических систем.

3. По результатам исследования были определены диапазоны оптимальных режимов центрирования линз микрооптики (частоты вращения детали и КАИ, скорость подачи) и выработаны рекомендации по характеристикам алмазного слоя КАИ, которые необходимо использовать при разработке гаммы центрировочных станков, работающих с КАИ.

Список литературы:

1. Технология обработки оптических деталей / под ред. д-ра техн. наук проф. М.Н.Семибратова. М.: Машиностроение, 1975 г.

2. Каталог Loh Opticmaschinen AG. Precision Optics. 2004.

3. Ломакин Ю.В., Грималюк М.В., Подобрянский А.В., Пушечников В.П., Перов А.В. Способ изготовления оптических линз // Патент РФ на изобретение №2127182.

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ КОЛЬЦЕВЫМ АЛМАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

# ВАСИЛЬЕВА С.Н., ГЛУХОВ Ю.А., ГРИМАЛЮК М.В., ЛОМАКИН Ю.В., ПОДОБРЯНСКИЙ А.В.

## Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

## E-mail: optica@npooptica.ru, atais@list.ru

В статье рассмотрены некоторые вопросы развития технологии прецизионного шлифования поверхностей оптических деталей (ОД) из хрупких материалов (оптическое стекло, сапфир, кремний, карбид кремния, германий и др.) с целью получения нанометрической точности и шероховатости поверхности. Приведены данные результатов экспериментальных исследований по определению предельных и оптимальных режимов предварительного и тонкого шлифования оптических деталей из оптического стекла кольцевым алмазным инструментом в схеме «жесткие оси» с целью получения шлифованных поверхностей по качеству, близких к полированным.

**Ключевые слова:** предварительное шлифование, тонкое шлифование, пластическое шлифование, электролитическая правка (ELID) алмазного инструмента, наношлифование, «жесткие оси».

Максимум времени и затрат при обработке оптических деталей (ОД) приходится на финишные операции, поэтому, естественно, этим операциям посвящено большинство разработок по технологии.

Наиболее развитыми в области оптических технологий обработки ОД, в том числе плоских поверхностей ОД являются Германия, США, Англия, Япония, Китай.

Потребность в управляемой сверхпрецизионной обработке (микрошлифовании) становится насущной, чтобы обеспечить постоянно растущие требования к сокращению размерных допусков и обеспечению высокой точности и качества обрабатываемых поверхностей ОД, когда требуется шероховатость обработанной поверхности порядка нескольких нанометров и минимальный уровень дефектного (подповерхностного) слоя.

Для реализации управляемого и стабильного процесса сверхтонкого шлифования поверхностей ОД с шероховатостью R<sub>a</sub> ≤10 нм и глубиной разрушенного слоя 1÷2 нм необходимы станки, обладающие следующими характеристиками:

 – высокая жесткость и динамическая устойчивость исполнительных органов;

 минимизация тепловых эффектов и трения;

встраивание современных средств измерения и управления;

 наличие программного обеспечения автоматической компенсации погрешностей системы управления.

Такое оборудование (станки с CNC) создано немецкими фирмами OptoTech, SatisLOH, Schneider, английской фирмой Zeeko и японскими фирмами.

Станки для суперпрецизионной обработки должны быть максимально защищены от внешних и внутренних вибраций, для чего используются специальные конструкции воздушных и масляных демпферов. Станины станков изготавливаются из виброгасящих материалов [1]. С учетом жестких требований по вибрации динамическая балансировка шпинделей с инструментом производится непосредственно на станке, т.к. первостепенное влияние на качество шлифуемой поверхности оказывает степень динамической

Таблица 1.	
Технические характеристики современных прецизионных станк	06

Модель станка	Nanotech 350UPL	Nanotech 500FG	PicoAce	Micromaster® MM	Robonano α-0iA
Фирма-разработчик	Precited	h (CIIIA)	Tetraform (Англия)	Kugler ( $\Phi P\Gamma$ )	Fanuc (Япония)
Управляемые оси	2 оси (Х и Z) "Т" конфигурация	3 линейных оси (X,Y,Z), Поворотная B-axis	2 линейных оси (X и Z), поворотная C axis	5 axes, X, Y и Z линейные оси, две поворотных оси (В и С)	5 осей, X, Y, Z линейные оси, две поворотных оси (В и С)
Базовая структура (основание, станина)	отливка, эпокси/ гранитная композиция	Монолитный натуральный гранит, ось Z колонна	Литой чугун	Мелкозернистый гранит	База из литого чугуна с бетоном.
Виброизоляция	Трехточечная пассивная воздушная изолирующая система	Трехточечная пассивная воздушная изолирующая система	Нет данных	Пневматическая виброизоляция	Воздушные и масляные демпферы
Система ЧПУ	Delta Tau	Fanuc 15i	Siemens 840D	Multiprocessor path control	Fanuc
Подшипники шпинделя (шлифовальный станок)	Воздушные опоры (жидкостное охлаждение)	Воздушные опоры (шпиндель изделия) Масляная гидростатика	Аэро- статические подшипники	Воздушные опоры	Воздушные опоры
Диапазон оборотов шпинделя, об/мин	50 - 6000	100 - 2000	100 - 6000	100 000 (Max)	20 000 - 100 000
Точность перемещений по осям	< 50 nm	Нет данных	< 50 nm	< 100 nm	< 100 nm
Направляющие	Гидро- статические направляющие	Гидро- статические направляющие	Гидростатичес- кие опоры	X, Y and Z (гидростатические опоры) В axis (механические опоры) С axis (аэростатические опоры)	Аэро- статические опоры
Система привода	Brushless DC linear motor	DC servo motor & ball screw	Нет данных	Linear motor	AC servo motor
Дискретность	0.034 nm	8.6 nm	1 nm (Z slide)	Нет данных	1 nm (X,Z)

устойчивости быстровращающейся системы «шпиндель – инструмент».

В табл. 1 приведены основные технические характеристики современных прецизионных станков, работающих в «жестких осях».

Как правило, на операцию шлифования (грубой и тонкой) требуется, примерно, в 2÷3 раза меньше времени, чем на операцию полирования. Чтобы уровнять время обработки ОД на этих двух операциях необходимо при работе одного шлифовального станка использовать для полирования 2 ÷ 3 станка, что приводит к увеличению технологической цепочки станочного оборудования.

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

Немецкими специалистами фирмы Opto-Tech [2] была разработана технология, которая позволила настолько улучшить шероховатость поверхности после шлифования, что время, затрачиваемое на полирование, сократилось до уровня операции шлифования.

По разработанной технологии, например, шлифование сферических поверхностей,

осуществляется в три перехода за одну установку.

Грубое и тонкое шлифование осуществляется комбинированным кольцевым алмазным инструментом, а супертонкое шлифование осуществляется сферическим инструментом с алмазными пятачками, установленным на втором инструментальном шпинделе шлифовального станка. Кинематика операции супертонкого шлифования схожа с процессом полирования, при котором притирочный инструмент осциллирует в плоскости, проходящей через верхнюю точку линзы. Результатом обработки по данной технологии является шлифованная под полирование поверхность, позволяющая осуществить её интерференционный контроль.

Различают три вида микрошлифования оптических материалов:

1. Шлифование с хрупким разрушением.

Съем материала осуществляется путем выкрашивания верхнего слоя материала (диспергирования) и образования поверхностного трещиноватого слоя за счет образования микротрещин, направленных под углом или по нормали к обрабатываемой поверхности.

2. Шлифование с пластическим резанием.

Съем материала осуществляется в виде сливной стружки. Выше основного материала образуется поверхностный пластически уплотненный слой. В пластичном режиме энергия перенесена в остаточную деформацию материала ОД.

3. Выглаживание.

При этом процессе съем материала фактически отсутствует. Пики трещиноватого слоя пластично деформируются и просто покрывают разрушенный слой. Инструмент при этом не самозатачивается, он «заса- ливается».

Метод DG-шлифования (пластическое шлифование) при котором обеспечивается качество полированной поверхности стал возможен благодаря созданию прецизионных станков с точностью перемещений до 10 нм и имеющих высокую динамическую жесткость системы СПИД.

Для каждого материала существует критическая глубина резания, при превышении которой процесс пластического шлифования переходит в процесс хрупкого разрушения поверхностного слоя, т.е. энергия, образующаяся при обработке (энергия трения), переносится не на остаточную деформацию материала, а тратится в большей степени на отрыв его частиц.

Критическая глубина резания составляет:

- для оптических стекол 60÷160 нм;

- для кремния и карбида кремния 180÷220 нм.

Процесс шлифования алмазным инструментом может быть стабильным при условии постоянного его вскрытия во время обработки.

При крупнозернистом инструменте (d ≥ 10 мкм, где d – средний размер алмазного зерна), работающего в режиме свободного резания при оптимальных для данного материала режимах резания создаются благоприятные условия самозатачивания инструмента.

Для инструмента с зернистостью алмаза менее 10 мкм шлифование в режиме самозатачивания уже невозможно.

4. Метод электролитической правки алмазного инструмента.

Одним из направлений в технологии микрошлифования, в том числе и для пластического шлифования, является способ электролитического вскрытия режущей поверхности инструмента с металлической связкой в процессе обработки – ELID [3].

На рис. 1 приведена схема микрошлифования с электролитической правкой в процессе обработки – метод ELID-шлифования. (рис.1)

При ELID-шлифовании СОЖ для шлифования должна быть электропроводна и вы-



Рисунок 1. Схема шлифования с электролитической правкой в процессе обработки (ELID)

полнять дополнительно функцию электролитической жидкости.

К алмазному кругу (электрод +) через токопроводящую щетку и к электроду из графита или меди (электрод –) подводится напряжение от источника постоянного тока, в результате чего происходит процесс электролитического разрушения связки алмазного круга и освобождения затупленных зерен алмаза, т.е. происходит процесс правки инструмента во время обработки.

ELID – метод целесообразен при обработке алмазным инструментом на металлической связке с размером зерна до 1 мкм.

Одной из современных технологий, обеспечивающих нанометрическое качество обрабатываемых поверхностей, является Grolish – технология для финишной обработки крупногабаритной оптики диаметром от 300 до 3000 мм, представленной на рынке фирмой Zeeko.

По Grolish – технологии [4] осуществляется зональная финишная обработка оптической поверхности в несколько переходов набором малоразмерного инструмента.

Малоразмерный инструмент – боннет (рис. 2) представляет собой надутую резиновую мембрану сферической формы с наклеенными на нее либо шлифующими элементами (алмазными, металлическими), либо гибкими полирующими подложками.

В каталоге оснастки фирмы Zeeko даны ссылки на боннет с радиусами от 10 до 80 мм, выбираемыми в зависимости от размеров обрабатываемой детали.

Использование различных инструментов с принудительным вращением (жестких, упругих – боннет) и способов обработки: ретушь упругим инструментом (Grolish) или бесконтактной доводкой струей абразивной суспензии, на базе одного станка с ЧПУ и управления по 7 управляемым осям позволяет значительно, в разы, ускорить процесс обработки, получать поверхности с большой асферизацией, значительно повысить качество поверхности, осуществлять в приемлемые сроки обработку таких твердых материалов, как карбид кремния

На базе этой технологии был обеспечен техпроцесс обработки шестигранных сегментов



Figure 1 metal-bonded diamond pellets on hard tool



Figure 4 Single metal-bonded diamond pellet on 40mm bonnet



Figure 7 Polyurethane on 40mm bonnet



Figure 2 resin-bonded diamond hard ring tool



Figure 5 stainless steel washers on 40mm bonnet



Figure 8 3M Trizact <sup>TM</sup> on 40mm bonnet



Figure 6 brass washers on 40mm bonnet



Figure 9 New bonnet with no active surface attached

Рисунок 2. Инструменты по технологии Grolish

Научно-технический журнал «Контенант»

телескопа Euro-50 на базе плоских дисков (ø 2300х70, стрелка асферичности поверхности 6 мм). Обработка осуществлялась в 3-4 перехода на отдельных станках для каждого перехода. Полный цикл обработки составил 15-20 часов, в том числе полирование – 3 часа.

При шлифовании в «жестких осях» схема торцевой обработки (рис. 3) более предпочтительна благодаря тому, что при этом обеспечивается лучшее динамическое качество системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) при высоких скоростях вращения инструмента, так как инструмент и деталь при обработке находятся в постоянном контакте, к тому же по этой схеме ведется также шлифование кольцевым инструментом сферических поверхностей оптических деталей (ОД).

Сотрудниками НПО «Оптика» проводились исследования процесса торцевого шлифования кольцевым алмазным инструментом с целью определения оптимальных режимов обработки, в том числе максимальных значений скоростей резания при соблюдении режима свободного резания в системе СПИД с повышенными характеристиками статической и динамической жесткости. Исследования про-



Рисунок 3. Схема торцевой обработки оптических деталей

водились на базе специально созданного макета шлифовального станка со встроенным высокоскоростным электрошпинделем фирмы Kavo (Германия) мод. 4061 DC-S.

Относительная жесткость шпинделей изделия и инструмента макета станка составляет j = 2,5 - 2,6 кг/мк .

Электрошпиндель модели 4061 DC-S имеет следующие характеристики и конструктивные особенности:

- частота вращения п<sub>и</sub> = 5000 ÷ 60000 об/мин;

- развиваемый крутящий момент до 65 H·см;

- опоры – керамические подшипники качения;

- смазка – консистентная;

- регулирование - бесступенчатое от преобразователя частоты;

- зажим инструмента – цанговый;

 охлаждение – воздушное (обдув охлажденным воздухом).

Конструктивно шпиндель модели 4061 DC-S выполнен так, что ротор электродвигателя и инструмент крепятся на одном валу, т.е. отсутствует кинематическая цепь для обеспечения частоты вращения до 60000 об/ мин и крутящего момента до 65H×см. Требуется высококачественное изготовление: с минимальным биением и дисбалансом всех вращающихся деталей шпинделя, высокое качество изготовления подтверждается отсутствием какой-либо вибрации на корпусе шпиндельной бабки и низким монотонным уровнем звука создаваемого шпинделем модели 4061 DC-S во всем диапазоне скоростей вращения.

Динамическая балансировка кольцевого алмазного инструмента осуществлялась на балансировочном станке модели АТМ-00 ЗУ по 1 кл. точности.

Конструкторско-технологические параметры обрабатываемых плоских ОД:

- диаметр 80 мм
- толщина 20 мм
- марка стекла К8

- диаметр наклеечного приспособления - 205 мм.

Кольцевой инструмент:

- размеры: d<sub>вн</sub> х d<sub>нар</sub> х h, мм - 50х57х14;

- марка и зернистость алмаза:

- AC 20 50/40 – при предварительном шлифовании;

- ACM 14/10 – при ТАШ

- концентрация алмаза - 25 %

- связка инструмента для ТАШ

- (медь-олово-железо-гидрид титана), % 76Cu14Sn5Fe5TiH4.

# Результаты экспериментальных исследований

Проводилось последовательно шлифование партий из 30 деталей при различных скоростях резания, начиная с величины V<sub>ин</sub> = 34 м/сек.

Величина осевой подачи инструмента S<sub>т</sub>

выбиралась исходя из условий обеспечения режима свободного резания.

При обработке каждой партии фиксировалось машинное время обработки – Тм; проводился контроль шероховатости – R<sub>a</sub> и величины износа алмазного инструмента за цикл обработки по высоте – h<sub>u</sub>.

Кроме этого, на одной ОД из каждой партии определялась толщина разрушенного (трещиноватого) слоя – F.

Шероховатость R<sub>а</sub> определялась с помощью профилографа-профилометра.

Величина разрушенного слоя F определялась методом последовательного сполировывания отшлифованных деталей до исчезновения элементов дефектного слоя (III класс чистоты) с точным замером высоты прополированного слоя.

<u>№</u> n <sub>ин</sub> , V <sub>ин</sub> ,		$V_{\rm uh},$	Основной припуск 1,5 ÷ 2,0 мм		Малый припуск 0,04 ÷ 0,05 мм		Т <sub>м</sub> ,	R <sub>a</sub> ,	h <sub>ин</sub> , мкм	F,
партии	00/мин	M/CCK	п₀, об/мин	S <sub>м</sub> , мм∕мин	п₀, об/мин	S <sub>м</sub> , мм∕мин	C	MKM	MKM	MKM
1	11400	34,0	500	3,5	50	0,35	60	1,6	0,1	3,5
2	14000	40,0	500	3,5	50	0,35	60	1,4	0,1	3,2
3	15000	45,0	500	3,5	50	0,35	60	1,2	0,08	2,8
4	16000	50,0	500	3,5	50	0,35	60	1,2	0,08	2,5
5	16000	50,0	700	5,5	70	0,55	50	1,2	0,1	2,8
6	16000	50,0	800	6,4	80	0,60	45	1,4	0,12	2,4

Таблица 2. Предварительное шлифование

# Таблица 3.

## Тонкое шлифование

№ партий	п <sub>ин</sub> , об/мин	V <sub>ин</sub> , м/сек	Основной припуск 0,05 ÷ 0,1 мм		Малый припуск 0,005÷ 0,01 мм		Т <sub>м</sub> ,	R <sub>a</sub> , мкм	h <sub>ин</sub> , мкм	F, мкм
p	0.07 11111		n <sub>o</sub> , об∕мин	S <sub>м</sub> , мм∕мин	n <sub>o</sub> , об∕мин	S <sub>м</sub> , мм∕мин	•		1,111,1	1,111,1
1	11400	34,0	200	0,15	50	0,03	60	0,16	0,7	1,3
2	14000	40,0	200	0,15	50	0,03	60	0,12	0,7	1,0
3	15000	45,0	200	0,15	50	0,03	60	0,1	0,5	0,8
4	16000	50,0	200	0,15	50	0,03	60	0,08	0,5	0,7
5	16000	50,0	300	0,22	50	0,03	50	0,08	0,7	0,7
6	16000	50,0	300	0,22	30	0,03	52	0,05	0,7	0,5
7	16000	50,0	200	0,15	20	0,02	66	0,04	0,7	0,5

Величина износа кольцевого алмазного инструмента h<sub>и</sub> определялась путем деления общей величины износа инструмента по высоте при обработке партии ОД на количество обработанных ОД.

В табл. 2 и 3 приведены экспериментальные результаты при предварительном и тонком шлифовании ОД.

## Анализ полученных результатов

Операция предварительного шлифования (табл. 2)

Из табл.2 видно, что первые четыре партии (№ 1 ÷ 4) деталей шлифовались с постепенным увеличением скорости резания при постоянной скорости подачи инструмента и частоты вращения детали, с тем, чтобы выявить для данной системы СПИД оптимальную скорость резания и наибольшую скорость резания, при которой нарушался процесс диспергирования стекла из зоны резания.

Предельная скорость резания, при которой инструмент прекращал нормальную работу диспергирования, составила V<sub>ин</sub> ≥ 50 м/сек; при этом нарушался режим самозатачивания инструмента и он «засаливался» в результате нарушения теплового баланса в зоне резания.

Оптимальная скорость резания составила  $V_{_{\rm HH}} = 45 \div 48$  м/сек, при которой было достигнуто самое высокое качество шлифуемой поверхности ( $R_a = 1,2$  мкм; F = 2,5 мкм) с наименьшим износом инструмента.

Операция тонкого шлифования представлены в табл. 3.

По аналогии с предварительным шлифованием первые четыре партии деталей были тонко отшлифованы с постепенным увеличением скорости резания при сохранении неизменными параметров и S<sub>м</sub>.

Оптимальная скорость резания в системе СПИД макета модели МШ-200К составила  $V_{_{\rm HH}} = 50$  м/сек при частоте вращения детали  $n_{_{o}} = 300/50$  и скорости подачи инструмента  $S_{_{\rm M}} = 0,22/0,03$  мм/мин.

Предельная скорость резания, при которой нарушается стабильность процесса шлифования из-за нарушения теплового баланса в контактной зоне инструмента и детали составляет V<sub>ви</sub> > 50 м/сек.

Наивысшее качество тонко отшлифованной поверхности ( $R_a = 0,06$  мкм; F = 0,5 мкм) получилось при  $V_{\mu\mu} = 45$  м/сек и небольших величинах частоты вращения детали и скорости подачи инструмента.

# Оптимальные режимы динамического балансирования инструмента

На быстроходных шпинделях металлорежущих станков, а в последнее время и на оптических станках [4] систему динамического балансирования инструмента в сборе со шпинделем инструмента стали встраивать непосредственно в станки. Причем наибольший эффект для получения высоко качества шлифуемой поверхности достигается, когда динамическое балансирование осуществляется на той же частоте вращения шпинделя, что и при обработке, т.е. на рабочей скорости.

Для определения влияния этого фактора на режимы и качество шлифования было проведено исследование процесса тонкого шлифования кольцевым алмазным инструментом партии ОД в количестве 20 шт. из карбида кремния.

Параметры детали:

- диаметр 80 мм
- толщина 12 мм
- материал SiC
- Инструмент:
- диаметр алмазоносного слоя ø 100х4 мм
- марка и зернистость алмаза АСМ 14/10
- концентрация алмаза 25 %

- связка (медь-олово-железо-гидрид титана), % - 76Cu14Cu5TiH4

Обработка ОД из карбида кремния выбрана из следующих соображений:

– во-первых, показать, что проведение двух переходов шлифования в "жестких осях" кольцевыми алмазными инструментами намного производительнее, чем проведение этих операций по классической технологии шлифования алмазными инструментами со связанным абразивом методом притира в 5 – 6 переходов [5];

 во-вторых, чтобы обеспечить динамическую балансировку инструмента с той же частотой вращения, что и при обработке, необходимо, чтобы рабочая частота вращения шпинделя инструмента попадала в диапазон регулирования балансировочного станка.

В нашем случае это условие соблюдалось, т.к. для получения оптимальной скорости резания для карбида кремния кольцевым алмазным инструментом 25 – 30 м/сек при диаметре кольца 92 мм необходима частота вращения 5200 – 5800 об/мин, что обеспечивается, так как максимальная частота балансировочного станка – 6000 об/мин.

# Влияние режима динамического балансирования инструмента на уровень вибрации его в сборе со шпинделем на различных частотах вращения

С помощью виброизмерительного прибора мод. ВМ-1 и сейсмического датчика ДН-3 были замерены амплитуды колебаний (вибраций) системы шпиндель-инструмент при различных частотах вращения и частотах его балансирования. Средние значения этих амплитуд приведены в табл. 4.

Из таблицы видно, что наименьшие значения амплитуд, а значит и дисбаланса вращающейся системы инструмент – шпиндель получаются при тех частотах его вращения, когда они совпадают с частотами, при которых проводилось динамическое балансирование инструмента.

# Влияние режима балансирования и частоты вращения шпинделя инструмента на качество шлифования при различных режимах подачи в конце цикла обработки

На четырех режимах вращения шпинделя инструмента (2000 об/мин, 4000 об/мин, 6000 об/мин) было отшлифовано четыре партии по 10 штук ОД из карбида кремния. Скорость резания кольцевого инструмента составляла



при различных режимах, соответственно 10 м/сек, 20 м/сек, 30 м/сек. Динамическое балансирование инструмента проводилось, соответственно, на тех же частотах вращения. Частота вращения шпинделя изделия составляла 50 об/мин. Скорость подачи инструмента составляла Sm = 0,05 мм/мин.

На рис. 4 представлена шероховатость поверхности  $R_a$  в функции скорости резания  $V_{\mu}$ .

Из графика видно, что оптимальным режимом шлифования ОД по качеству поверхности (R<sub>a</sub>) является режим скорости резания 25 - 30 м/сек и соблюдение условия проведения динамического балансирования инструмента при той же частоте вращения.

# ТОНКОЕ ШЛИФОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫМ АЛ-МАЗНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ С ЭЛЕКТРОЛИТИ-ЧЕСКОЙ ПРАВКОЙ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

Для получения нанометрического качества шлифуемой поверхности, обработка

Таблица 4.
Средняя амплитуда колебаний шпинделя инструмента в зависимости от
частот врашения и частот балансирования

Инструмент отбалансирован	Частота вращения шпинделя инструмента				
при частоте вращения (об/мин)	2000	4000	6000		
2000	2,0	4,0	9,0		
4000	2,5	1,5	4,0		
6000	12,0	5,0	1,5		

#### Таблица 5.

#### Характеристика алмазных кольцевых инструментов

Инструмент отбалансирован	Частота вращения шпинделя инструмента			
при частоте вращения (об/мин)	2000	4000	6000	
2000	2,0	4,0	9,0	
4000	2,5	1,5	4,0	
6000	12,0	5,0	1,5	

должна осуществляться алмазным инструментом зернистостью менее 5 мкм. При такой зернистости инструмент уже не может работать в режиме механического самозатачивания. Происходит «засаливание» инструмента и процесс обработки становится невозможным. Поэтому для осуществления процесса микрошлифования алмазным инструментом с размером зерна менее 10 мкм необходима принудительная правка режущей поверхности.

Одним из таких способов является способ электролитической правки инструмента в процессе обработки – ELID-технология.



Рисунок 5. Установка электролитической правки

Была смонтирована установка электролитической правки и отдельно от макета блок питания установки пульсирующим постоянным током (рис. 5).

На рис. 6 представлена механическая часть установки электролитической правки.

Схема шлифования ОД с использованием способа электролитической правки алмазного инструмента на макете станка показана на рис. 7.

Характеристики алмазных кольцевых инструментов приведены в табл. 5.

Алмазный кольцевой инструмент (АКИ) сборной конструкции: корпус-державка с приклеенным к ней алмазным кольцом.

Собранный АКИ динамически балансировался на балансировочном станке модели АТМ-003 на частоте вращения 6000 об/мин с достижением параметра остаточной неуравновешенности 0,6 ÷ 0,8 г см.

Режущие свойства инструмента и усилия резания при шлифовании определялись по силе тока в обмотках электрошпинделя инструмента благодаря адаптивной системе, встроенной в макет.

### Смазочно-охлаждающая жидкость

В качестве СОЖ-электролита при исследовании применяли водный раствор со следующими компонентами:

- NaCl 15 %
- глицерин 5 %
- лигносульфанат 0,2 %.

## Определение оптимального режима электролитической правки

Механизм электролитической правки и ориентировочные параметры по току и напряжению, подаваемы е на электроды, были известны из зарубежных источников по ELID-технологии [3], [4].

Таблица 6. Режимы при тонком шлифовании деталей из стекла К8

Папаметр	Инструмент			
TupunoTp	ACM 14/10	ACM 5/3		
Частота вращения инструмента, об/мин	6000	6000		
Частота вращения ОД, об/мин	500/50	500/50		
Скорость рабочей подачи, мм/мин	0,05	0,03		

Оптимальные значения напряжения и тока определялись при тонком шлифовании деталей из стекла К8 на режимах указанных в табл. 6.

Экспериментально были определены следующие оптимальные значения подаваемых тока и напряжения:

- V = 60 В для обеих инструментов;

- І<sub>вскр</sub> = с 1 до 10 А для вскрытия нового или засалившегося инструмента;

- I = с 1 до 2 А в процессе обработки

Время вскрытия инструмента составило:

- для инструмента 14/10 – 6 мин;

- для инструмента 5/3 – 3,5 мин.

Оптимальные значения параметров подаваемого на электроды тока соответствуют режиму работы алмазного инструмента на грани его засаливания и при минимальном его износе.

# Сравнительный анализ техпроцессов ТАШ без электролитической правки инструмента

Одним и тем же инструментом с зернистостью алмазов 14/10 было отшлифовано по 20 блоков с наклеенными по «жесткому» способу заготовками ø 80 x 15 (5 шт. на блоке) из оптического стекла К8. Усилие резания определялись по показаниям амперметра адаптивной системы макета станка. Результаты приведены в табл. 7.

Из графика на рис. 7 видно, что усилия резания при ТАШ с электролитической правкой значительно (4 – 5 раз) меньше, чем при ТАШ без электролитической правки. Также существенное отличие является огромным преимуществом ТАШ с электролитической правкой, т.к. кроме того, что процесс обработки протекает стабильно при меньших си-



Рисунок 6. Механическая часть установки электролитической правки
#### Таблица 7.

Ma LITT	Сила р	езания, Н
JNº HII	без электролитической правки	с электролитической правкой
1	510	100
2	530	100
3	560	100
4	580	100
5	590	100
6	590	100
7	600	100
8	600	100
9	610	100
10	630	110
11	640	120
12	640	130
13	640	130
14	650	130
15	650	120
16	650	120
17	670	110
18	680	130
19	690	130
20	700	140

### Сравнение усилий при шлифовании при ТАШ без электролитической правки и с электролитической правкой

лах пропорционально уменьшаются деформации в системе СПИД станка, а значит, повышается точность обработки – уменьшается разрушенный слой стекла.

## Сравнительный анализ зависимости и качества ТАШ с применением электролитической правки и без ее применения

Одним и тем же инструментом с зернистостью алмаза 14/10 были отшлифованы четыре пары блоков с ОД с различными скоростями осевой подачи инструмента Sm = 0,05; 0,10; 0,15; 0,20 мм/мин. Затем проводился контроль шероховатости обработанных поверхностей каждой пары блоков ОД (по 10 оптических поверхностей) и наихудшие значения  $R_a$  заносились в табл. 8. При дальнейшем увеличении скорости подачи в первом случае (без электролитической правки) процесс ТАШ нарушался – инструмент засаливался, во втором случае (с электролитической правкой) процесс ТАШ не нарушался, но требовалась более интенсивная правка инструмента, то есть резко увеличивался износ инструмента с некоторым ухудшением качества поверхности до R<sub>a</sub> 0,1 мкм.

Такие же эксперименты были выполнены для ТАШ инструментом зернистостью 5/3 только для процесса с электролитической правкой, т.к. без электролитической правки ТАШ инструментом с зернистостью алмазов менее 10 мкм не возможен.

Таблица 8.
Сравнение производительности и качества поверхностей, получаемых
при ТАШ с электролитической правкой

Sm,	R <sub>a</sub> , мкм							
	14/	5/3						
ММ/МИН	без электролитической с электролитической		с электролитической					
	правки	правкой	правкой					
0,03	_	—	0,03					
0,05	0,10	0,06	0,03					
0,10	0,13	0,07	0,04					
0,15	0,17	0,07	0,05					
0,20	0,22	0,08	-					





Схема шлифования ОД с использованием способа электролитической правки алмазного инструмента

На рис. 8 представлен график зависимости качества шлифования от скорости подачи инструмента. Анализ графика на рисунке позволяет сделать следующие выводы:

 при увеличении скорости подачи при ТАШ без электролитической правки происходит ухудшение качества обрабатываемой поверхности вплоть до нарушения процесса из-за засаливания инструмента;

при ТАШ с электролитической правкой
 с увеличением скорости подачи до пока не

определенного предела, качество поверхности практически не ухудшается;

– при ТАШ алмазным инструментом с зерном 5/3 шероховатость обработанных поверхностей так же не меняется с увеличением производительности и приближается по качеству к полированной поверхности, что позволит значительно сократить время последующего полирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

#### Выводы

Для обеспечения постоянно растущих требований к точности и качеству оптических компонентов в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства при дефиците квалифицированных операторов-оптиков, единственно правильным направлением развития сегодня оптических технологий, в том числе и для плоской оптики, является обеспечение механической обработки оптических деталей на станках с ЧПУ в «жестких осях», где точность и качество обработки определяется точностью и жесткостью системы СПИД, а необходимая гибкость технологического процесса – программным обеспечением.



#### Рисунок 8. Качество шлифования в зависимости от скорости подачи инструмента

### Предложения

Для обеспечения требований к обработке плоской и сферической поверхностей, оптики с нанометрической точностью и качеством поверхности с получением минимального (бездефектного) ее подслоя необходимо вести развитие концепции микро- и наношлифования в «жестких осях» кольцевым алмазным инструментом в следующих направлениях:

Создание прецизионных шлифовальных оптических станков с ЧПУ, работающих по методу торцевого шлифования с высокой статической и динамической жесткостью, термостабильностью и обеспечением точности перемещения с дискретой 0,1 мкм.

Осуществление на этих станках пластического шлифования хрупких материалов, при котором съем материала происходит срезанием пластической стружки, а не выкалыванием частиц, за счет образования при хрупком шлифовании трещин на поверхностном слое материала, что позволит получить поверхность с шероховатостью до 1 нм, практически без трещиноватого слоя, т.е. тем самым исключается операция полирования.

Обеспечение одного из основных условий пластического шлифования твердых материалов инструментом на металлической связке при размере зерна алмаза до 1 нм – вскрытие рабочей поверхности инструмента за счет применения метода электролитической правки, особенно при обработке твердых материалов – сапфира, лейкосапфира, керамики, карбида кремния и др.

#### Список литературы:

1. *Д. Стефенсон и др.* Сверхпрецизионный шлифовальный станок по концепции Tetraform// Журнал СТИН.02.2003г.

2. Ю.А. Глухов, А.В. Подобрянский . Современное оборудование и технологии для обработки оптических деталей// Контенант. 2014.т. 13. №2.С 43-58.

3. *M RAHMAN, A SENTHIL KUMAR, H S LIM and K FATIMA*. Nano finish grinding of brittle materials using electrolytic in-process dressing (ELID) technique. Финишное наношлифование хрупких материалов с электролитической правкой в процессе шлифования // Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260S-adhan-a Vol. 28, Part 5, October 2003, pp. 957–974. © Printed in India.

4. D.D. Walker u ∂p. Quantitative Comparison of Three Grolising Technigues for the Precessions<sup>™</sup> Process SPIE //Optical Manufacturing and Testing Conferense, San Diego, 2007, Auqust

5. Akira Yamamoto, Hitoshi Ohmori, Yamagata Yutaka, Sei Moriyasu and Yuu Muramatsu .Study on ELID grinding for quartz blank. Изучение ELID шлифования кварцевых подложек// RIKEN Review No. 34 (April, 2001): Focused on Advances on Micro-mechanical Fabrication Technique.

6. Исследование и разработка инструмента со связанным абразивом для механической обработки микрооптики и деталей из карбида кремния// Отчет о научно-исследовательской работе ФГУП «НПО «Оптика». Москва. 2007 г.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДОВОДОЧНЫЕ СТАНКИ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ВНЕОСЕВЫХ ЗЕРКАЛЬНЫХ КОЛЛИМАТОРОВ

### ГОРШКОВ В.А., САВЕЛЬЕВ А.С., НЕВРОВ А.С., КОРНЕЕВ Н.Г.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

#### E-mail: optica@npooptica.ru

Достижения компьютерной технологии автоматизированного формообразования крупногабаритных оптических деталей с получением дифракционного качества изображения, разработанные в ОАО «НПО «Оптика», позволяют расширить технологические возможности формообразования высокоточной асферической оптики. Рассмотрены основные задачи при создании автоматизированной технологии производства высокоточной оптики дифракционного качества.

**Ключевые слова:** автоматизированное формообразование, асферическая оптика, внеосевой коллиматор.

Высокоразрешающие оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования, применяемые для научных исследований, глобального мониторинга поверхности Земли, состояния ее атмосферы и т.п., требуют высокого качества формируемого этими системами изображения исследуемого объекта.

Диапазон габаритных параметров оптических компонентов указанных систем 300 - 3000 мм, а номинальные требования к качеству формы поверхности по критерию среднеквадратического отклонения  $\sigma_{cko} = \lambda/60 \div \lambda/80$ , что, по сути, является технологическим пределом.

Актуальной задачей создания технологии производства указанных деталей является создание управляемого процесса формообразования оптических поверхностей на различных стадиях, в т.ч. минимизации технологических переходов и создания для этих целей нового класса оптического оборудования с компьютерным управлением всего технологического цикла[1].

Основными задачами при создании автоматизированной технологии производства высокоточной оптики дифракционного качества являются:  – создание управляемого процесса формообразования;

 – создание технологических систем стабилизации формы поверхности и компьютерная оптимизация параметров систем;

 – создание нового поколения оптического станочного парка с компьютерным управлением;

 – создание интерференционных метрологических средств амплитудного, амплитуднофазового и фазового типов для обеспечения контроля за обработкой формы поверхности в реальном масштабе времени;

– создание комплексной технологической системы автоматизированного обеспечения технологии формообразования оптических поверхностей с достижением точностных параметров по отклонению формы в пределах λ/60÷λ/80 и шероховатости поверхности в пределах 5÷10 Å.

Интегральной оценкой характеристики любой технологической операции должны являться характеристики формы поверхности:

– среднеквадратическое отклонение -  $\sigma$ ;

– размах ошибки - (P-V);

– составляющие ошибки поверхности (астигматизм, кома и т.п.).



Рисунок 1. Блок схема ТЕСАФ

Таблица 1. Технические характеристики внеосевых зеркальных коллиматоров, изготовленных в ОАО «НПО «Оптика»

Рабочее поле, Ø мм	Среднеквадра- тическая ошибка формируемого волнового фронта СКО ( $\lambda$ =0,6328 мкм)	Фокусное расстояние, мм	Внеосевой параметр, мм	Дополнительное оборудование
220	λ/50	4012,0	200,0	Корректор поля, интерферометр
400	λ/40	6663,0	577,0	Фотоприемное устройство с вычислительным комплексом
600	λ/30	5976,5	600,0	Эталонное зеркало
1000	λ/55	10009,5	1790,0	Эталонное зеркало

Блок-схема разработанной в ОАО «НПО «Оптика» технологической системы автоматизированного формообразования «ТЕСАФ» приведена на рис. 1.

С применением «ТЕСАФ» [2] на предприятии ОАО «НПО «Оптика» изготовлено более 300 оптических элементов различных типоразмеров, в т.ч. внеосевые зеркальные коллиматоры предназначенные для создания плоского эталонного волнового фронта в широком диапазоне спектра: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) излучения и применяются для контроля и аттестации качества оптико-электронных комплексов (ОЭК), качества оптических компонентов.

Внеосевой коллиматор (ВК), оснащенный в зависимости от выполняемых функций той или иной оптико-электронной аппаратурой, используется для контроля:

 волнового фронта как отдельных оптических компонентов, так и объективов, и ОЭК;

концентрации энергии в кружке рассеяния;

 – распределения энергии в кружке рассеяния;

- функции передачи модуляции.

Преимущества внеосевых зеркальных коллиматоров состоят в возможности коллимировать волновой фронт в широком диапазоне длин волн и, в отличие от осевых зеркальных коллиматоров, не имеют центрального экранирования.

В ОАО «НПО «Оптика» разработаны, изготовлены и поставлены на предприятия России и в страны ближнего и дальнего зарубежья внеосевые зеркальные коллиматоры (ВК) с рабочим полем от 200 мм до 1000 мм.

В состав ВК входят обязательные компоненты:

- внеосевое параболическое зеркало;

- фокальный узел.

Для расширения функций коллиматоры могут быть дополнены:

- интерферометром;

- оптическими эталонными компонентами.

Технические характеристики некоторых ВК, изготовленных в ОАО «НПО «Оптика» приведены в табл. 1.

### Список литературы:

1. В.А.Горшков, А.С.Невров, А.С. Савельев, А.В.Подобрянский Формообразование внеосевых асферических поверхностей на автоматизированных полировально-доводочных станках с компьютерным управлением // Оптический журнал. 2010. Т.78. №10. С.16-20.

2. В.А.Горшков, А.В.Подобрянский. Технологический автоматизированный комплекс для формообразования высокоточных оптических поверхностей // Оптический журнал. 2010. Т.78. №10. С.3-11.

## ВНЕОСЕВЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОЛЛИМАТОРЫ С РАБОЧИМ ПОЛЕМ 200 ÷ 1000 мм ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

#### ГОРШКОВ В.А., КОРНЕЕВ Н.Г.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

E-mail: optikal@npooptica.ru

В статье представлены технические данные внеосевых зеркальных коллиматоров, изготавливаемых в Открытом акционерном обществе «Научно-производственное объединение «Оптика».

**Ключевые слова:** внеосевой зеркальный коллиматор, внеосевое параболическое зеркало, автоматизированное формообразование.

Внеосевые зеркальные коллиматоры предназначены для создания плоского эталонного волнового фронта в широком диапазоне спектра: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) излучения.

Преимущества внеосевых коллиматоров (ВК) в том, что их зеркальная система не имеет дополнительных оптических компонентов, устанавливаемых в коллимированном пучке [1].

В состав ВК входят компоненты:

- внеосевое параболическое зеркало;

- фокальный узел.

Внеосевое зеркало устанавливается в юстируемом блоке. Блок состоит из оправы, предназначенной для базирования и разгрузки зеркала, и юстировочных подвижек, обеспечивающих повороты зеркала вокруг горизонтальной и вертикальной осей.

Подвижки используются при сборке и юстировке ВК, при периодической его поверке, а при работе ВК – подвижки блокируются.

Фокальный узел предназначен для установки тест-объектов (мира, точка, полуплоскость).

Фокальный узел имеет три взаимно-перпендикулярные линейные подвижки для установки тест-объекта в фокусе внеосевого зеркала при юстировке коллиматора и блокируются при его работе.

Для расширения функций коллиматоры могут быть дополнены:

- интерферометром;

- оптическими эталонными компонентами.

Внеосевой коллиматор (ВК), оснащенный в зависимости от выполняемых функций той или иной оптико-электронной аппаратурой, используется для контроля и измерений:

 волнового фронта отдельных оптических компонентов, объективов, и оптико-электронных комплексов (ОЭК);

 концентрации энергии в кружке рассеяния;

– распределения энергии в кружке рассеяния;
– функции передачи модуляции.

Основным компонентом ВК является внеосевое асферическое зеркало [2]. Зеркала изготавливаются с применением комплексной технологии автоматизированного формообразования высокоточных оптических поверхностей, созданной открытым акционерным обществом «Научно-производственное объединение «Оптика» (ОАО «НПО «Оптика») [3].



Рисунок 1. Общий вид внеосевого коллиматора (диаметр выходного пучка 370 мм)



а – объектив ОЭК



б – внеосевой коллиматор в 400 мм

Рисунок 2. Общий вид коллиматора в 400 мм в процессе юстировки объектива ОЭК



Рисунок 3. Общий вид ВК с внеосевым зеркалом 600 мм × 300 мм

Рабочее поле, Ø мм	Среднеквадра- тическая ошибка формируемого волнового фронта СКО ( $\lambda$ =0,6328 мкм)*	Фокусное расстояние, мм	Внеосевой параметр, мм	Дополнительное оборудование
220	λ/50	4012,0	200,0	Корректор поля, интерферометр
400	λ/40	6663,0	577,0	Фотоприемное устройство с вычислительным комплексом
600	λ/30	5976,5	600,0	Эталонное зеркало
1000	λ/55	10009,5	1790,0	Эталонное зеркало

Таблица 1. Технические характеристики внеосевых коллиматоров, изготавливаемых в ОАО «НПО «Оптика»

\*СКО согласовывается с Заказчиком при выполнении заказа.

Дополнительное оборудование, входящее в комплект внеосевых коллиматоров: интерферометр; дифракционная точка; полуплоскость; миры; источники излучения видимого и ИК диапазонов; фильтры для различных диапазонов спектра; эталонное плоское зеркало; корректор поля

Технические характеристики некоторых ВК, изготовленных и поставленных различным предприятиям, приведены в табл. 1.

На рис. 1 показан общий вид изготовленного в ОАО «НПО «Оптика» коллиматора ø 370 мм, используемого для измерения оптических характеристик ОЭК.

ВК оснащен поворотными зеркалами для сокращения занимаемой им площади с целью встраивания его в технологическое оборудование заказчика.

На рис. 2 показан общий вид коллиматора ø 400 мм, изготовленного в ОАО «НПО «Оптика», в процессе юстировки объектива ОЭК.

На рис. 3 показан общий вид ВК с интерферометром в его фокальной плоскости при контроле плоского зеркала в технологическом цикле изготовления зеркала.

Широкий диапазон задач, решаемых с помощью ВК, и вышеперечисленные его преимущества дают возможность осуществлять юстировку объективов ОЭК в реальном масштабе времени с визуализацией качественной картины концентрации энергии в кружке рассеяния и количественной характеристикой функции передачи модуляции, позволяет повысить качество их юстировки.

#### Список литературы:

1. Внеосевые зеркальные коллиматоры. // Росприбор. РФ/catalog/lazer/collimator/html

2. Внеосевые параболические зеркала // www/tydexoptics. com/ ru/ products/ spectroscopy/ oap-mirrors

3. Горшков В.А., Невров А.С., Савельев А.С. Технология автоматизированного формообразования асферических, в том числе внеосевых, поверхностей оптических элементов для оптико-электронных систем наземного и космического базирования// Тез. докл. конф. «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». г. Лыткарино, ОАО «ЛЗОС», 2014.

## МНОГОСПЕКТРАЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ВНЕОСЕВОГО ЗЕРКАЛЬНОГО КОЛЛИМАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### ВАСИЛЬЕВА Е.Ю., ГОРШКОВ В.А., ЧУРИЛИН В.А.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

E-mail: optikal@npooptica.ru

В статье приведена принципиальная схема и технические характеристики многоспектральной установки на базе внеосевого зеркального коллиматора для контроля качества оптических систем.

Ключевые слова: пространственная частота, коэффициент передачи модуляции, функция передачи модуляции, функция рассеяния точки, функция рассеяния линии, функция рассеяния края полуплоскости.

В ОАО «НПО «Оптика» на базе внеосевого зеркального коллиматора создана установка, позволяющая проводить оценку качества изображения прецизионных оптических систем, работающих в различных областях спектра от видимого до дальнего ИК-диапазона:  $\lambda_1 =$  от 0,4 до 1,1 мкм,  $\lambda_2 =$  от 3 до5 мкм,  $\lambda_3 =$  от 8 до 12 мкм.

Установка обеспечивает измерение функции рассеяния линии, функции рассеяния точки, функции рассеяния края полуплоскости и расчет на основе анализа этих измерений функции передачи модуляции (ФПМ), а также определение плоскости наилучшего изображения и определение рабочего отрезка измеряемого объектива.

Общий вид установки приведен на рис. 1.

Принципиальная блок-схема установки приведена на рис. 2.

Технические характеристики установки приведены в табл. 1.

Для контроля широкой номенклатуры оптических систем, предусмотрены различные варианты тест-объектов, которые входят в состав осветителей (рис. 2, поз. 3, 4):

- щелевая диафрагма переменной ширины;

 граница темно-светлого поля (полуплоскость);

- набор точечных диафрагм.

Объективы переноса изображения увеличивают изображение тест–объектов, полученных в плоскости анализа испытуемой системы, и трансформируют их на чувствительную площадку приёмных камер.

Для трех спектральных диапазонов измерений используются соответствующие приемники излучения:

- камера ЗАО «Лептон» (  $\lambda$  = от 0,4 до 1,1 мкм );

- камера *TVC 300ML-Sp* ООО «СТК Силар» ( $\lambda =$ от 3 до 5 мкм );

- камера *IR-118* (Тайвань) ( $\lambda =$ от 8 до 14 мкм).

Соответственно тест-объектам, программное обеспечение имеет алгоритмы вычисления ФПМ.

Определение плоскости наилучшего изображения производится в реальном масштабе времени перемещением анализатора вдоль оптической оси установки до получения максимального значения ФПМ на заданной пространственной частоте.



Рисунок 1. Общий вид установки

Аттестация установки проводилась в трех спектральных диапазонах на объективах от интерферометра разработки ОАО «НПО «Оптика», имеющих дифракционное качество (среднеквадратическое отклонение сферического волнового фронта не менее  $\lambda/40$ ): A=1:6 для  $\lambda$  =0,63 мкм; A=1:2 для  $\lambda$  =3 ÷ 5 мкм; A=1:1 для  $\lambda$  =8 ÷ 12 мкм.

Результаты аттестации установки на всех

трех спектральных диапазонах приведены в табл. 2.

Рис. 3 демонстрирует пример одного из вариантов измерения ФПМ (тест-объект щелевая диафрагма).

Погрешность измерения ФПМ указанных объективов составила 0,04 относительной единицы во всех спектральных диапазонах, что не превышало требования технического задания на установку.



#### Рисунок 2.

Принципиальная блок-схема установки:

 1 - базовая плита с виброизоляцией; 2 - платформа поворотная; 3 - осветитель с металлокерамическим источником типа K5; 4 - осветитель с лампой КГМ; 5 - зеркало; 6 - зеркало внеосевое асферическое; 7 - объективодержатель; 8 - испытуемый объектив; 9 - объектив переноса изображений 8<sup>x</sup>; 10 - объектив переноса изображения 14<sup>x</sup>; 11 - объектив переноса изображения 20<sup>x</sup>; 12 - анализатор;
 13 - камера IR118; 14 - камера ЗАО «Лептон»; 15 – камера TVC 300ML-Sp; 16 - ноутбук; 17 – компьютер; 18 - столик компьютерный; 19 - принтер; 20 - контролируемое изделие (тепловизор)

### Таблица 1.

## Технические характеристики многоспектральной установки

Параметр	Значение
	параметра
1. Фокусное расстояние коллиматора (внеосевое асферическое зеркало), мм	1850
2. Световой диаметр коллиматора, мм	250
3. Щелевая диафрагма переменной ширины тест-объекта, мм	от 0 до 0,4
4. Граница темно-светлого поля (полуплоскость) тест-объекта, мм	20
5. Длина волны излучения осветителей:	
– лампа КГМ 12-100, мкм	λ = от 0,4 до 1,1
<ul> <li>металлокерамический излучатель типа К5, мкм</li> </ul>	λ = от 1,1 до 14
6. Характеристики сменных приемников излучения:	
6.1 Камера цифровая ЗАО «Лептон» с ПЗС матрицей «Kodak»:	
– спектральный диапазон, мкм	λ= от 0,2 до 1,1
- количество элементов	1920×1080
– размеры элемента, мкм	5,5×5,5
6.2 Камера ООО «СТК Силар» <i>TVC 300ML-Sp</i> :	
– спектральный диапазон, мкм	λ= от 1,1 до 5
– количество элементов	320×256
– размер элемента, мкм	40×40
– охлаждение приемника	жидкий азот
6.3. Камера IR 118:	
– спектральный диапазон, мкм	λ= от 8 до 14
– количество элементов	384×288
– размер элемента, мкм	25
7. Кратность увеличения объектива переноса:	
$-$ для $\lambda$ от 0,4 до 1,1 мкм, крат	$20^{\times}$
$-$ для $\lambda$ от 3 до 5 мкм, крат	$14^{\times}$
<ul> <li>– для λ от 8 до 14 мкм, крат</li> </ul>	8×
8. Спектральный диапазон измерения ФПМ, мкм	λ <sub>1=</sub> от 0,4 до 1,1
	$\lambda_2 =$ от 3 до 5
	λ <sub>3=</sub> от 8 до 12
9. Диапазоны пространственных частот измерения ФПМ, мм <sup>-1</sup>	
– видимая область	от 0 до 150
– ИК-область	от 0 до 40
10. Угловое поле зрения контролируемых оптических систем 2 <i>β</i> , град	90
11. Линейное поле зрения в плоскости анализа 2у', мм	30
12. Фокусное расстояние контролируемых объективов, мм	от 10 до 1000
13. Погрешность измерения ФПМ, отн. ед., не более	0,05
14. Габаритные размеры, мм:	
<ul> <li>– оптико-механический блок</li> </ul>	2975×1560×1650
<ul> <li>вычислительный блок</li> </ul>	1000×600×1000
15. Масса установки, кг	1600



Рисунок 3. Измерение ФПМ (Тест-объект щелевая диафрагма)

Таблица	2.
---------	----

Результаты аттестации установки в различных спектральных диапазонах

N,	Спектральный		Расчетное	Измеренное
лин/мм	диапазон, мкм	Объектив	значение ФПМ	значение ФПМ
5			0,95	0,94
10		A=1:2	0,90	0,90
15	3÷5		0,84	0,84
20			0,80	0,80
30			0,69	0,72
50			0.77	0,76
50		A=1:6	0,77	(0,74)*
100	0.62		0,57	0,53
100	0,05			(0,50)*
150			0.28	0,34
130			0,38	(0,35)*
10			0,87	0,88
20	0.10	A - 1 · 1	0,73	0,74
30	ð÷1∠	A-1.1	0,59	0,58
40			0,48	0,46

\* Результаты измерений на установке OTS 500 (ФРГ)

Список литературы:

1. В.К. Кириловский, Ле Зуй Туан Оптические измерения. Часть 6. Санкт-Петербург 2008.131с.

2. Д.В. Иванов, А.А. Хропов, Е.П. Кузьмин, А.С. Карпов, В.С. Лемпицкий. Лекция 7: Дискретизация. Антиалиасинг. Геометрические преобразования растровых изображений: версия для печати и PDA/Алгоритмические основы растровой графики. http://www.intuit. ru/department/graphics/rastrgraph/7/

3. *М.Я. Шульман* Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. 208с.

4. *Р. Шеннон, Д. Вайнт* Проектирование оптических систем. М.: Мир, 1983. 430с.

5. Системы для измерения MTF (ЧКХ) для промышленного применения. http://blms.ru/ sistemy-izmereniya-chkh, 2014 г.

## ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ПРИЗМ ПРИ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ, МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

### ВАСИЛЬЕВА С.Н., ГЛУХОВ Ю.А., ГРИМАЛЮК М.В., ЛОМАКИН Ю.В., ПОДОБРЯНСКИЙ А.В.

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Оптика»

E-mail: teopt@npooptica.ru

В статье рассматриваются некоторые особенности построения технологического процесса обработки призм при мелкосерийном, многономенклатурном производстве, принципы оптимального построения техпроцесса обработки, минимизации количества специальной оснастки, особенно прецизионной.

**Ключевые слова:** призмы, обработка призм, алмазный инструмент, технология, реновация, обрабатывающие центры, базирование, сепараторы, жесткий или эластичный методы.

Серийность производства – основной показатель, определяющий выбор технологии изготовления призм исходя из экономических показателей производства. При крупносерийном производстве оправдано изготовление специальной, в том числе прецизионной, оснастки и использование специализированного оборудования, сроки подготовки производства которого достаточно велики, переналадка оборудования на другую деталь, как правило, не производится и потому не является определяющим фактором в техпроцессе и требованиям к станкам.

Технология мелкосерийного и единичного производства однотипна.

Основные принципы построения техпроцесса с учетом особенностей современного мелкосерийного и многономенклатурного производства:

- механическая обработка призмы должна начинаться с изготовления заготовки из блочного стекла или пластины, так как изготовление прессовок, близких по форме к готовой детали, при мелкосерийном и единичном производстве не всегда осуществимо;

- в связи с этим технология должна предусматривать съем больших припусков или отпиливание частей заготовки; - обработка фасонных поверхностей (радиусных галтелей, сопряжений и т.п.) должна производиться не специальным фасонным инструментом, а обкаткой по контуру;

- технология должна строиться на использовании минимального количества оснастки, особенно прецизионной;

- стоимость специальной оснастки и инструмента, отнесенная к одной детали должна включаться в калькуляцию изделия непосредственно, т.к. может значительно превосходить другие затраты;

- ручные операции, требующие высококвалифицированной рабочей силы: подгонка углов, обработка фасонных поверхностей и т.д., должны быть, по возможности, исключены;

- в технологии должно быть задействовано минимальное количество станков, как по назначению, так и по типоразмерам;

- преимущественное использование станков с ЧПУ, обеспечивающих выполнение нескольких операций и переходов в одном технологическом цикле минимизирует время переналадки;

- с целью обеспечения максимальной загрузки оборудование должно быть широкоуниверсальным и использоваться при обработке всей номенклатуры оптических деталей, включая сферические и асферические. Использование специальных станков для обработки призм рационально при достаточно больших и постоянных объемах их выпуска.

Наиболее близки к изложенным выше принципам являются методы обработки, заложенные в современных станках с ЧПУ и возможностями современных поворотных столов, использующих метод технологического комплекса (метод Тваймана) [1].

Преимущества метода:

- высокая точность обработки углов, недостижимая при других методах, поскольку основные рабочие грани призм располагаются, как правило, параллельно некоторой оси, именно эти грани обрабатываются с максимальной точностью за счет высокой точности угловых и линейных перемещений;

- исключается погрешность наклейки и установки приспособления;

- при обработке фасонных поверхностей – скруглений, галтелей, сопряжений, где используется дорогой специальный инструмент, возможна обработка универсальным инструментом методом контурной обкатки с использованием ЧПУ;

возможность обработать с одной базировки любое количество граней (вплоть до 24-х у многогранников) и вспомогательных поверхностей (фасок, скосов, фасонных поверхностей);

- призма не базируется при обработке каждой грани, отпадает необходимость в прецизионной оснастке и вспомогательных операциях;

- все операции могут выполняться на станках с ЧПУ в одном технологическом цикле.

Особенно эффективны эти преимущества при использовании станков с ЧПУ, где настройка положения шпинделя и обработка происходят автоматически по программе и с использованием современных прецизионных поворотных столов. Такие поворотные столы изготавливаются с точностью индексации до 2-х угловых секунд. Использование системы ЧПУ позволяет вместе с рабочими гранями обрабатывать и вспомогательные поверхности: скругления, скосы, фаски и т.д. На рис. 1 приведены примеры обработки по методу технологического комплекса некоторых из широко применяемых призм.

Из этих примеров видно, что за две установки можно обработать 10 и более поверхностей с точностью недоступной традиционным методам обработки. Кроме того, для обработки каждой из этих поверхностей понадобилось бы приспособление для крепления призм, а некоторые поверхности (скругления, фаски) при малой серии обрабатываются только вручную, так как делать специальный фасонный инструмент не целесообразно.

Точность геометрических размеров определяется конструкцией станка (жесткость, точность позиционирования) и технологией (минимизация усилий резания).

Шероховатость же поверхности определяется как конструкцией станка (жесткость, уровень вибраций), так и технологическими факторами и инструментом.

При этом шероховатость и производительность обработки вступают в противоречие: получение минимума шероховатости требует использования алмазного инструмента с минимальной зернистостью, обладающего малой производительностью. Противоречие решается применением обработки в несколько переходов. При традиционной технологии для этого требуется переналадка при смене инструмента и переустановка детали, снижающая ее точность. Идеальными для этой цели являются станки, у которых смена инструмента производится автоматически без съема и установки детали, т.е. осуществляется обработка с одной установки заготовки.

В табл. 1 представлены данные о предельной величине съема стекла для различной зернистости алмаза, выше которой инструмент работает в нестабильном режиме с засаливанием. На каждом переходе съем должен быть не менее припуска предыдущего перехода и не больше максимального съема для данного.

Зависимость основных показателей процесса (производительности Q, параметра шероховатости R<sub>a</sub>, удельного расхода алмаза q) от зернистости алмаза показана на



Рисунок 1.



Рисунок 2.



Зернистость алмаза	400/315	315/250	250/200	200/160	160/125	125/100	100/80	80/63	63/50	50/40	40/28	28/20
Шероховатость R <sub>a</sub> , мкм	4,0	2,0	2,0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,25	1,1	0,7	0,6	0,4
Припуск, мм	1,5	1,0	0,7	0.5	0,35	0,25	0,2	0,18	0,15	0,12	0,1	0,05
Съем макс., мм	Н	е лими	гируетс	Я	3,0	2,0	1,5	1,0	0,7	0,5	0,4	0,2
Скорость съема, мм/мин	5,0	3,0	2,5	2,1	1,7	1,3	1,0	0,7	0,5	0,4	0,25	0,1

Таблица 1. Данные о предельной величине съема стекла для различной зернистости алмаза

рис. 2 [2]. Эти зависимости носят качественный характер, так как конкретная шероховатость определяется еще и связкой, маркой алмаза, состоянием станка, выхаживанием, СОЖ и др. Величина шероховатости определяет припуск, который нужно удалить на последующей операции, если он не лимитируется глубиной отдельных царапин. Усредненная величина припуска (нарушенного слоя) для удаления последующими переходами для различных величин шероховатостей представлена в табл. 1.

В табл. 2 сравниваются 2 варианта обработки плоской оптической детали с общим припуском 5 мм: традиционный, например, на станке «Алмаз 250» в два перехода и на обрабатывающем центре. Выбор малого числа переходов традиционного процесса определялся тем, что при смене инструмента требуется ручная наладка станка (~1 час), а в процессе обработки время установки и съема деталей значительно увеличит трудоемкость.

Выбор зернистости алмаза на переходах определяется тем, что на финише должна быть зернистость не грубее 40/28, которая может снять без засаливания не более 0,5 мм и обеспечивает припуск на тонкое шлифование 0,1 мм. Весь остальной припуск (4,5 мм) должен снять 1-ый переход. Минимальная зернистость алмаза инструмента, которая может это обеспечить – 200/160.

На обрабатывающем центре процесс смены инструментов происходит автоматически из магазина, нет операции установки детали, сокращается время обработки, каждый из переходов снимает припуск меньше предельного для него, инструмент работает в стабильном режиме, заканчивается процесс инстру-

		традиционный	и на обрабан	пывающем це	ентре			
		Дейст	вующая тех	нология				
3 anuurorti	Стем	Мин. припуск	Скорость	Время, мин.				
алмаза	Съсм, ММ	для следующей операции	съема, мм/мин.	Машинное	Вспомогательное	Общее		
200/160	4,5	0,5	2,1	2,1	1,0	3,1		
40/28	0,5	0,1	0,25	2,0	1,0	3,0		
ИТОГО:								
	M	ногопереходный	процесс (обр	абатывающи	ий центр)			
400/315	2,7	1,5	5,0	0,6	1,0	1,5		
200/160	1,5	0,5	2,1	0,7	0,1	0,8		
80/63	0,6	0,18	0,7	0,8	0,1	0,8		
28/20	0,2	0,05	0,1	1,0	0,1	1,1		
ИТОГО:								

Таблица 2. Два варианта обработки плоской оптической детали с общим припуском 5 мм: традиционный и на обрабатывающем центре

ментом с зернистостью 28/20, после которого припуск на последующую операцию супертонкого шлифования составляет 0,05 мм.

На рис. 3 представлена зависимость производительности шлифования от линейной скорости инструмента V для 2-х видов связок (МО 4 и С22) при различных удельных давлениях на инструмент [3]. К приведенным данным следует относиться критически, так как на показатели накладывается влияние других факторов: вибраций, связанных с резонансными частотами шпинделя, правильность подачи охлаждения и его объем, качество алмаза и др.

Зависимость производительности от скорости инструмента в м/сек для различных материалов и связок [4] представлена на рис. 4.

Если по рис. 3 производительность с увеличением скорости от 5 до 30 м/сек увеличивается в 1,5 – 2 раза, то по рис. 4 – до трех раз. При работе на действующих тихоходных фрезерных станках фактическая скорость иногда составляет менее 2 м/сек. Экстраполируя данные рис. 3, можно сделать вывод, что увеличение скорости от 2 до 35 м/сек. позволяет увеличить производительность в 3 – 5 раз. Разумеется, для этого необходимо выполнение соответствующих требований к конструкции станка: подача охлаждения, минимальный уровень вибраций, инструмент и шпиндель, отбалансированные по высокому классу.

Приведенные данные подтверждаются опытом эксплуатации обрабатывающих центров для стекла и камня, оснащенных высокоскоростными шпинделями и имеющими производительность (например, скорость подачи) в 5 раз больше, чем принято при обработке оптических деталей [4]. Увеличение линейной скорости инструмента дает еще один важный эффект – снижение составляющих усилия резания при прочих одинаковых условиях.

На рис. 5 показана зависимость составляющих усилия резания в Н:  $P_z$  (вертикальная) и  $P_x$  (направление подачи) при фиксации других показателей [5]. Экстраполируя данные графика до скоростей, фактически применяемых на фрезерных станках (до 2м/сек.), можно видеть, что эти силы при увеличении скорости резания до 30 м/сек. снижаются в 3-5 раз.

Снижение усилий резания увеличивает точность обработки, снижает вибрации, смягчает требования к жесткости оснастки. Для обработки деталей из стекла это особенно важно, так как уменьшается опасность механического повреждения детали, образования выколок и сколов.



Рисунок 4.





#### Выводы:

 для мелкосерийного многономенклатурного производства основным требованием при разработке технологии механической обработки призм на этапе предварительной обработки заготовок является минимизация количества специальной оснастки, особенно прецизионной, для конкретной детали;

- наиболее полно этому требованию отвечает метод технологического комплекса, когда от одной установочной базы, используя поворот детали в одной или нескольких плоскостях, обрабатывается несколько поверхностей призмы, включая основные и вспомогательные (фаски, скосы, скругления);

 при обработке по этому методу точность размеров и взаимного расположения поверхностей определяется не точностью оснастки, а точностью исполнительных движений станка (линейных перемещений, углов поворота);

- применение метода технологического комплекса предполагает использование стан-ков с ЧПУ [6] с управлением 4-мя или 5-ю координатами (3 – линейных и 1 – 2 угловых);

 осуществить съем больших припусков, повысить производительность и улучшить качество поверхности после обработки, уменьшить припуск на последующие финишные операции позволяет использование многопереходной обработки с одной установки детали. Для ее реализации станки должны оборудоваться магазином инструментов, автоматической сменой его по заданной программе с широким применением комбинированных инструментов;

- для увеличения производительности и уменьшения усилий резания целесообразна обработка при скоростях резания до 30 – 40м/ сек, для реализации которых при диаметре инструмента 50 мм требуется шпиндель с частотой вращения 20000 об/мин. с широким диапазоном регулирования вниз от номинала;

- для работы на таких скоростях станок должен оборудоваться совершенной системой охлаждения, включающей систему подачи СОЖ через центр шпинделя, насосы с высоким давлением (до 10 атм.), управляемые сопла для подачи СОЖ.

Список литературы:

1. F. Twyman. Prism and lens making, London, 1952.

2. *Хрульков В.А. и д*р. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении. М.: Машиностроение, 1977. 223 С.

3. *Перерозин М.А.* Справочник по алмазной обработке стекла. М.: Машиностроение, 1987. 222 С.

4. Die Läpp-Technik . Издание Stähli AG, Швейцария, 2001. 35 С.

5. Handbuch Feinbearbeitung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1979. 474 C.

6. Проспекты и каталоги, коммерческие предложения фирм: LOH, OPTOTECH, Peter Wolters (ФРГ), Stähli, Schaublin (Швейцария), HAAS (США), NIKKEN, ROLAND (Япония), Ciele (Италия).

## ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ СЕТОК МЕТОДОМ ПРОЖИГАНИЯ ЛАЗЕРОМ, ЗАПОЛНЕНИЯ ЗАПУСКОМ, НАНЕСЕНИЯ РИСУНКА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕКЛЯННОЙ ПОДЛОЖКИ

#### ДЬЯКОВА И.И., ЛЕЛЯНОВ А.Б., БАБИН С.А., БЕССМЕЛЬЦЕВ В.П., ДОСТОВАЛОВ А.В.

ОАО «Швабе - Приборы», г. Новосибирск Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

#### E-mail: post@tochpribor.com

В статье рассмотрена технология и оборудование для нанесения на стеклянной подложке прицельных знаков по результатам НИР. Основное внимание уделено технологии, которая незаслуженно мало используется в оптическом приборостроении.

Ключевые слова: прицельное устройство, лазерная абляция, фемтосекундный лазер.

В последнее время характерно повышение технических требований для стрелкового оружия: расширение диапазона работы прицельных устройств (оптическое прицельное устройство совместно с коллиматорным), увеличение дальности прицеливания, применение прицельного устройства с возможностью быстрого переключения увеличения при переносе стрельбы с ближних дистанций на средние.

Данные требования приводят к необходимости проектирования и изготовления многофункциональных прицельных знаков, а именно прицельных знаков, работающих при смене оптического увеличения, имеющих разную ширину штриха, сочетающих в себе характеристики оптических и коллиматорных прицельных элементов.

Традиционными технологиями получения изображения рисунка на стекле являются:

метод получения изображения травлением органического защитного покрытия (воск) на стекле с последующим запуском;

метод получения изображения фотолитографией по металлическому слою (хром, алюминий, серебро).

К технологическим процессам нанесения

изображения рисунка предъявляются следующие требования:

обеспечение точности воспроизведения изображения элементов (ширины штрихов, диаметра отверстия, их расположения, допустимые отклонения этих величин);

обеспечение оптических характеристик (спектральных коэффициентов пропускания и отражения подложек, постоянства оптических характеристик в зависимости от условий эксплуатации, стабильности во времени); чистоты поверхности.

При использовании метода получения изображения травлением защитного покрытия минимальная ширина штриха составляет 4,0 – 10,0 мкм с допуском ± 2,0 мкм.

При использовании метода получения изображения фотолитографией по металлическому слою, ширина штриха составляет 1,25 мкм и зависит от используемого фоторезиста и точности изготовления фотошаблона.

Данные методы не позволяют получить изображение на стекле для современных прицелов, имеющих особые требования к изображению.

Технология нанесения сеток методом лазерной абляции [1], заполнения запуском, нанесения рисунка на металлическом покрытии объединяет две традиционные технологии получения изображения рисунка на стекле в два этапа.

Первый этап: получение рисунка абляцией лазером поверхности стеклянной подложки с последующим запуском с целью получения изображения для оптического прицела,

Второй этап: нанесение изображения методом абляции лазером металлического слоя (хром, алюминий, серебро в зависимости от требований к коэффициенту пропускания оптической системы) с целью получения изображения для коллиматорного прицела.

Технология нанесения рисунка сеток методом лазерной абляции даёт возможность получать изображение шкал, имеющих разную ширину штрихов, что невозможно получить традиционным методом гравировки по защитному покрытию (воск) и последующим травлением.

Технологический процесс заключается в создании штрихов заданной ширины согласно требованию чертежа с глубиной, равной соотношению 1:4 глубины к ширине штриха для обеспечения достаточной глубины штриха, необходимой для заполнения запуском, предотвращающей его выкрашивание.

С целью совмещения рисунка, наносимого по металлическому слою, вне световой зоны создаются установочные реперные метки, по которым на втором этапе проводится выставление положения точки фокусировки лазерного излучения для выполнения требования смещения двух рисунков с требуемым допуском.

Работа выполнялась на технологическом комплексе высокоточной фемтосекундной модификации материалов. Комплекс состоит из лазерного излучателя марки PHAROS 6 W, высокоточного позиционера ABL100 фирмы Aerotech. Система обратной связи между блоками управления лазером и драйвером позиционера позволяет проводить процесс модификации по строго заданным траекториям перемещения образца.

Фемтосекундный лазер, воздействующий на обрабатываемый материал лазерным из-

лучением в виде очень коротких (1 фемтосекунда = 10<sup>-15</sup> секунды), сжатых импульсов позволяет достичь высокого уровня плотности энергии. Именно использование фемтосекундных импульсов позволяет локализовать область воздействия и избежать образования сколов и трещин в области модификации стекла [2].

На первом этапе работ были проведены эксперименты по записи методом лазерной абляции поверхности образца согласно чертежам заказчика.

Длина волны излучения, длительность импульса, частота следования импульсов, мощность подбирались конкретно для получения требуемых параметров. Фокусировка излучения осуществлялась с помощью асферической линзы. При этом ширина штриха составляла величину 0,02 и 0,035 мм, погрешность изготовления составила менее 0,004 мм.

На втором этапе работ после заполнения запуском и нанесения защитного покрытия в центральной области образца было удалено металлическое покрытие без повреждения стекла.

Параметры излучения отличаются от параметров лазерной абляции на поверхности стекла, что обусловлено более низким порогом абляции металла.

Центрировка образца выполнялась по заранее нанесенным меткам на областях вне защитного покрытия.

Система управления технологическим комплексом построена на ЧПУ и имеет 2 степени свободы по осям X и Y. Программируя работу комплекса из графического редактора CorelDraw, AutoCAD, LaserCUT гарантируется безошибочное выполнение задания. При повторной абляции стекла нужно только нажать «START» чтобы начать работать, т. к. задание записывается в память технологического комплекса.

Режимы лазерной абляции варьируются в зависимости от марки стекла и зеркального металлического покрытия.

Прицельное приспособление – совокупность оптического 4<sup>x</sup> - 6<sup>x</sup> кратного прицела (для точного распознавания цели на средних и дальних дистанциях) и коллиматорного  $1^{\times}$  кратного прицела позволяет использование его в прицелах для ближнего боя и для дистанционного ведения стрельбы, быстро менять прицельное приспособление в условиях перехода от одной дистанции к другой.

Достоинствами сетки, сочетающей в себе коллимационную марку прицеливания и оптическую шкалу, являются:

- светящаяся прицельная коллимационная марка остаётся невидимой со стороны цели, её видит только стрелок;

- позволяет точно и быстро навести оружие на цель на ближних дистанциях;

- предоставляет при коллиматорной марке возможность перемещения головы и глаза в больших пределах, не теряя из вида прицельную марку и цель;

- позволяет при стрельбе по подвижной цели легко делать упреждение;

- параллакс при коллиматорной марке не превышает 1-2 угловых минут в крайних участках зоны видимости марки, что соизмеримо с разрешающей способностью глаза, и не оказывает влияния на точность стрельбы;

- с применением оптического прицела, возможно, одновременно наблюдать цель и прицельно-дальномерную шкалу, не требуя постоянной перестройки зрения;

- быстро переключающееся увеличение обеспечивает тактическое преимущество при переносе стрельбы с ближних дистанций на средние, использующих разные оптические увеличения; - позволяет вести стрельбу в вечернее и утреннее время.

Рекомендуется применять конструкцию сеток с использованием двухступенчатой технологии нанесения рисунка (нанесение штрихов методом лазерной абляции стеклянной подложки и нанесение рисунка лазерной абляции металлического зеркального слоя) в изделиях, сочетающих в себе систему оптического прицела и коллиматорного (имеющего светящуюся центральную точку или центральный знак (пика)) по аналогии с прицелами канадской фирмы «Elcan Optical Technologes».

В целях увеличения коэффициента пропускания, рекомендуется в качестве зеркального покрытия применять серебряное покрытие либо другое, имеющее высокий коэффициент отражения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

### Список литературы:

1. *Markillie G. A. J., Baker H. J., Villarreal F. J., and Hall D. R.* Effect of vaporization and melt ejection on laser machining of silica glass micro-optical components // Applied Optics. 2002. vol. 41. no 27. pp. 5660–7.

2. Lenzner M., Krüger J., Kautek W., and Krausz F. Precision laser ablation of dielectrics in the 10 - fs regime // Applied Physics A. 2000. vol. 371. no. 1999, pp. 369–371.

# РАЗВЕРТКА С ВИНТОВЫМ ЗУБОМ НА КАЛИБРУЮЩЕЙ ЧАСТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

### ГРЕЧИШНИКОВ В.А., РОМАНОВ В.Б., КУЗЬМЕНКО А.А.

ФГБОУ ВПО Московский государственный технологический университет «Станкин»

E-mail: ittf.stankin@gmail.com, Alykuz2110@mail.ru

В статье рассмотрены конструкции разверток для обработки отверстий глубиной до 8 диаметров, представлена их классификация, рассмотрена возможность совершенствование их конструкций, в том числе при обработке ступенчатых отверстий, предложена инновационная конструкция цилиндрической развертки с винтовым зубом на калибрующей части.

Ключевые слова: развертка, протяжкаразвертка, отверстие.

В настоящее время в машиностроении для окончательной обработки отверстий деталей оптических приборов применяются цельные и сборные развертки различных конструкций (рис. 1).

Наибольшее применение находят цилиндрические прямозубые развертки, как правило – с четным количеством зубьев, развертки, включающие режущую часть с направляющим конусом и калибрующую часть, включающую цилиндрический участок и участок с обратной конусностью. Их изготавливают как из твердого сплава, так и из быстрорежущей стали. Эти развертки позволяют обрабатывать отверстия глубиной до 8 диаметров [1].

К недостаткам этих разверток относятся – невысокая точность и качество обработанной поверхности, вызванные повышенными вибродинамическими характеристиками процесса. Для обеспечения высокой точности и малой шероховатости поверхности обычно используется комплект разверток, что, естественно, существенно снижает производительность и, как следствие – удорожает сто-имость.

Известно техническое решение зарубежных инструментальных фирм «Nikken» (Япония) и «Hegenscheidt» (Германия), которые изготавливают развертки оригинальной конструкции, получившие название протяжкоразвертки [2].

Особенностью этого инструмента является то, что зубья развертки образуют крутую спираль, угол подъема которой около 75°. Благодаря этому, в процессе работы обеспечивается плавность хода инструмента, увеличивается его жесткость и виброустойчивость. По сравнению с развертками традиционных конструкций протяжкоразвертки позволяют увеличить скорость резания в 2-3 раза, а подачу – в 2 раза.

К недостаткам этих разверток следует отнести повышенную энергоемкость процесса обработки и невысокую стойкость инструмента, обусловленные весьма значительными осевыми нагрузками и сложностью изготовления.



Рисунок 1. Классификация разверток

С целью повышения стойкости инструмента при сохранении высокой производительности и качества обработки.

Снижения осевых усилий без ухудшения вибродинамических характеристик развертки предполагается новая конструкция.

Цилиндрическая развертка с, не менее чем двузубой рабочей частью, включающей режущую часть с направляющим конусом и калибрующую часть, включающую цилиндрический участок и участок с обратной конусностью, выполняется с винтовыми зубьями с углом подъема по крайней мере на элементе калибрующей части с углом подъема  $\omega_{\rm k} \approx 75^{\circ}$ , направление которых противоположно направлению вращения развертки, угол подъема зубьев режущей части  $\omega_{\rm p} \approx 0^{\circ}$  (рис. 2).

Цилиндрическая развертка состоит из рабочей части 1 с зубьями 2, шейки 3 и хво-



Рисунок 2. Развертка рабочей части развертки

стовика 4. Рабочая часть 1 включает направляющий конус 5, выполненный как правило под углом 45°, конусную режущую часть 6 (с углом  $\phi \approx 1-3^\circ$  – в пределах припуска на обработку отверстия) и калибрующую часть 7 с цилиндрическим участком 8 и участком 9 с обратной конусностью.

Зубья 2 выполнены винтовыми на всей калибрующей части 7 с углом подъема  $\omega_{\rm r} \approx 75^{\circ}$  и с направлением винтовых зубьев противоположным направлению вращения развертки. На всей длине режущей части 6 развертки зубья выполнены с углом подъема  $\omega_{\rm p} \approx 0^{\circ}$ , а на всей длине калибрующей части 7 развертки зубья выполнены винтовыми с углом подъема  $\omega_{r} \approx 75^{\circ}$ . Такое исполнение применимо для обработки достаточно хрупких материалов, когда стружка крошится в процессе обработки и ссыпается в предварительно сформированное сквозное отверстие. В случае обработки вязкого, пластичного материала, склонного к образованию сливной стружки, угол подъема  $\omega_{\rm p}$  предпочтительно выбрать больше 0°, например 5°-15°. В этом случае осевое усилие подачи останется невысоким, а стружка стабильно направляется в сторону предварительно сформированного сквозного отверстия. При этом вибро-динамические параметры резания при входе развертки в обрабатываемое отверстие сначала (на условно черновом этапе обработки) будут хуже, чем в прототипе, однако по мере углубления развертки и включения в работу спиральной калибрующей части, вибродинами-



Рисунок 3. Общий вид развертки

ческие параметры практически сравняются с прототипом и к концу обработки начальный «жесткий» вход инструмента в обрабатываемое отверстие будет практически компенсирован плавной калибровкой. Осевое усилие подачи при этом будет снижено до 45%.

Более плавные характеристики процесса обработки отверстия предложенным инструментом достигаются в случае, когда угол подъема зубьев режущей части выполнен монотонно изменяющимся от 0° на заходе режущей части до 75° на сопряжении режущей и калибрующей частей. Осевое усилие подачи при этом будет снижено до 30%.

Еще более плавные характеристики процесса обработки отверстия предложенным инструментом достигаются в случае, когда угол подъема зубьев рабочей части выполнен монотонно изменяющимся от  $0^{\circ}$  на заходе режущей части до  $75^{\circ}$  на сопряжении цилиндрического участка и участка с обратной конусностью калибрующей части. Осевое усилие подачи при этом будет снижено до 15-20%.

Цилиндрическая развертка работает следующим образом.

Развертке сообщается вращательное по часовой стрелке (v на рис. 3) и поступательное в осевом направлении (s на рис. 3) движение. Развертка направляющим конусом 5 входит в обрабатываемое отверстие и, по мере продвижения, режущей частью 6 зубьев 2, имеющих нулевой или сравнительно небольшой угол подъема  $\omega_p$ , при минимальном осевом усилии, срезает соответствующий припуск. Этой части обработки присущи сравнительно высокие вибродинамические нагрузки в зоне обработки. Далее, по мере продвижения развертки в отверстие, в работу вступает калибрующая часть 7 развертки со сравнительно большим углом подъема ω<sub>к</sub>, при этом плавность обработки существенно возрастает, а осевое усилие также увеличивается, что является положительным фактором для чистовой обработки пластическим деформированием – калибровкой.

В зависимости от применяемых параметров, описанных выше, достигается соответствующий результат.

В заключении можно сделать следующие выводы по предлагаемой конструкции: - достигнуто снижение осевых усилий без ухудшения вибродинамических характеристик развертки;

- более плавно осуществляется процесс резания при развертывании;

- возможна обработка отверстий (например, отверстие со шпоночной канавкой);

- упрощается изготовление винтового зуба, который имеется только на калибрующей части.

Дальнейшее развитие развертки с винтовым зубом отражено на рис. 1:

- развертки ступенчатые с винтовым зубом на 1-ой ступени;

- развертки ступенчатые с винтовым зубом на 2-ой ступени;

- развертки ступенчатые с винтовым зубом на 1-ой и 2-ой ступени, но с разным направлением.

### Список литературы:

1. Пат. 68399 Российская Федерация, МПК 7 В23D 77/00. Машинная развертка [Текст] / Холмогорцев Ю.П., Устимов Е.С.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Челябинский тракторный завод-УРАЛТРАК». - №2007114595/22; заявл. 17.04.2007; опубл. 27.11.2007, Бюл. №33

2. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. *Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю.* - Томск: Издательство ТПУ, 2005. - 92с.

# ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ БЕЛКА В МОЛОКЕ ПО РАССЕЯНИЮ СВЕТА

## ЯКИМОВА М.А, ГРИГОРЬЯНЦ А.Г., МЕЛЬНИКОВ Д.М., АЛЕХНОВИЧ В.И., САДКОВ А.Б., КРЕТОВ Д.К.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

#### E-mail: Marya.korotaeva@yandex.ru

В статье рассматривается задача создания малогабаритных портативных приборов и методик работы с ними, позволяющих обеспечить требуемую точность контроля состава и свойств различных сред. Рассматривается оптический метод контроля содержания белка в молоке путем анализа поглощения образца с использованием проб различной толщины либо разной концентрации.

Ключевые слова: состав и структура вещества (молока), анализатор содержания белка, длины волн поглощения и рассеяния излучения.

Повышенное внимание к экологическим проблемам приводит к необходимости повсеместного контроля состава и свойств различных сред: воды, почвы, атмосферы, продуктов питания и др. Причем в большинстве случаев требуется определение параметров вещества в экспресс-режиме либо непрерывный мониторинг состояния объекта в «полевых» условиях. С этой задачей не могут справиться высокоточные лабораторные приборы, требующие определенных условий проведения измерений, длительного времени проведения экспериментов, сложной подготовки пробы. Актуальной становится задача создания малогабаритных портативных приборов и методик работы с ними, позволяющих обеспечить требуемую точность результатов.

Задача осложняется тем, что большинство представляющих интерес объектов имеют сложный состав и неоднородную структуру. К таким средам относится большинство биологических объектов, таких как кровь, соки, молоко. Контроль состава молока представляет особый интерес в связи с возрастающими требованиями к качеству отечественных продуктов питания.

Количественный анализ состава молока сложен из-за следующих факторов:

- большого количества компонентов, содержание которых не является постоянным;

- существенной зависимости структуры молока от внешних факторов, стадии процесса переработки, типа термообработки;

- возможное наличие посторонних примесей (антибиотики, сухое молоко, растительные жиры, вода, крахмал) [1].

Большинство существующих в настоящее время анализаторов состава молока является стационарными. Наиболее распространенными методами анализа в подобных приборах являются Фурье-спектроскопия и БИКспектроскопия. Сложность заключается в том, что спектр поглощения молока сильно зависит от рассеяния излучения на частицах, а также от наличия в продукте различных примесей. Как правило, эту проблему решают, создавая обширные библиотеки спектров, из которых, используя, например, регрессионный анализ выбирают наиболее близкие к экспериментальным. Недостатки такого подхода очевидны: дорогостоящее габаритное оборудования и необходимость проведения огромного объема предварительных экспериментов. Необходимо также отметить, что предусмотреть все возможные вариации состава и структуры вещества практически невозможно, а значит, будет иметь место погрешность, устранить которую невозможно [2, 3].

Наиболее широко используются экспрессанализаторы состава молока, работа которых основана на анализе поглощения ультразвуковых волн компонентами молока. Однако ультразвуковой метод позволяет непосредственно измерить только содержание жира и сухих обезжиренных веществ в пробе. Для определения прочих компонентов используются приближенные выражения, что естественно, снижает их точность и достоверность полученных результатов.

Менее распространен флуоресцентный анализатор содержания жира. Его использование предусматривает использование химических реактивов, а точность и устойчивость к изменению содержания сопутствующих компонентов продукта невысока. Рефрактометрический анализатор содержания белка также предусматривает химическую обработку пробы, но точность и устойчивость результатов, полученных с его помощью существенно выше.

Представляется возможным решить этот вопрос путем использования следующих решений:

- разработка измерительной схемы, максимально чувствительной к интересующему компоненту, но практически нечувствительной к влиянию остальных компонентов.

- разработка методик измерения, позволяющих получить как можно более полную информацию о пробе (в идеале – без применения химических реактивов, градуировочных характеристик и т.д.)

Определение оптимальной конструкции измерителя содержания белка должно учитывать особенности взаимодействия оптического излучения с частицами белка. В первую очередь необходимо учитывать длины волн поглощения и рассеяния излучения. В случае многокомпонентных сред длина волны должна быть выбрана таким образом, чтобы ее ослабление исследуемым компонентом было гораздо более интенсивным, чем другими компонентами. Кроме того, оптическая система должна обеспечивать минимальное влияние многократно рассеянного излучения. Это сделает возможным расчет параметров процесса с более высокой точностью.

Ни одна из этих задач не может быть решена в полной мере. Длину волны излучения, взаимодействующую только с белками, подобрать практически невозможно. Это обусловлено тем, что ослабление излучения белком происходит в основном за счет рассеяния излучения, а этот процесс имеет место в широком диапазоне длин волн и его максимум зависит от размеров частиц, а значит, изменяется в зависимости от условий, в которых было получено и переработано молоко. Кроме того, в состав молока входит большое количество компонентов, спектры ослабления которых неминуемо накладываются друг на друга. В частности, в спектральной области рассеяния белка наблюдается интенсивное рассеяние излучения мелкими частицами жира. Но, несмотря на это, оптимизация конструкции измерительной системы способна существенно сократить число параметров, оказывающих влияние на результаты взаимодействия излучения с веществом и сделать принципиально возможным их математический учет и анализ.

Альтернативой дальнейшему усложнению конструкции измерительного оборудования может послужить создание методик измерения, позволяющих получить максимально возможную информацию о пробе, так и сократить влияние сопутствующих компонентов продукта. Как выяснили выше, наиболее распространенные в настоящее время - использование градуировочных характеристик, стандартных образцов, приближенных формул малоэффективны для экспресс-анализа молока. Широко известен метод дифференциальной спектроскопии, основанный на сравнении исследуемой пробы с образцом, не содержащим определяемый компонент. Но в случае молока получить такую пробу практически невозможно. Обычно в распоряжении оператора, производящего измерения, есть только образец исследуемого молока. Однако и на этом образце можно получить достаточную информацию без усложнения

конструкции. Например, известен метод анализа поглощения образца с использованием ряда проб различной толщины либо разной концентрации. Подобный прием может быть использован при определении концентрации белка в молоке. Работа с сильноразбавленной пробой позволяет получить информацию о взаимодействии излучения с практически одиночными частицами. Сопоставление этих данных с информацией о рассеянии излучения исходной пробой дает возможность более точно оценить содержание компонента. Естественно, что проведение ряда измерений на разных концентрациях продукта даст больше информации об объекте, но сделает эксперименты и анализ данных более длительными. В этом случае выбор количества экспериментов определяется требованиями к точности и скорости проведения исследований. Следует заметить, что подготовка пробы в этом случае не требует более сложных, чем вода, химических реактивов, не занимает много времени и проста (по сравнению с используемыми аналогами).

## Список литературы:

1. Розенберг Г.В. Физические основы спектроскопии рассеивающих веществ // Успехи физических наук. 1967. Апрель. Т. 91. Вып. 4. 2. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. — М.: Техносфера, 2007. — 363 с.

3. Зинченко В., Богомолов В. БИК-анализ в определении качества // Комбикорма. 2002. № 6.

# ФОТОАКУСТИЧЕСКАЯ ГОМОГЕНИЗАЦИЯ МОЛОКА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

#### АЛЕХНОВИЧ В.И., ГРИГОРЬЯНЦ А.Г., ЯКИМОВА М.А, МЕЛЬНИКОВ Д.М., БАРАНОВ Д.А.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: Marya.korotaeva@yandex.ru

В статье рассматриваются некоторые методы и средства контроля полидисперсных многокомпонентных сред. Дисперсность частиц снижается путем гомогенизации пробы - дробления частиц. Широкое распространение получили методы воздействия на частицы лазерным излучением. Применяется фотоакустический эффект для воздействия на наночастицы, биологические клетки и другие структуры.

Ключевые слова: гомогенизация пробы, лазерное излучение, фотоакустический эффект.

Развитие современных технологий невозможно без развития точных средств контроля. Особенно важны они в отраслях, непосредственно связанных со здоровьем человека, например в медицинской и пищевой промышленности. Абсолютное большинство объектов в этих областях являются неоднородными и сильно рассеивающими. Большинство методов анализа адаптировано для работы с прозрачными однородными средами. Анализ полидисперсных многокомпонентных сред по сравнению с ними осложняется рядом факторов [1]:

- взаимное влияние различных компонентов жидкости, приводящее к погрешностям измерений;

- частицы различных размеров дают различный отклик на измерительное воздействие;

- наличие в жидкости посторонних веществ (случайные примеси, последствия фальсификации и др.), заранее спрогнозировать и учесть присутствие которых не всегда возможно;

- изменение свойств жидкости с течением времени (что особо актуально для биологических жидкостей);

- влияние параметров окружающей среды на свойства жидкости.

Часто для проведения измерений и минимизации погрешностей требуется специальная обработка пробы или создание особых условий в зоне проведения измерений. Это может быть [2]:

- химическая обработка пробы, направленная на выделение анализируемого компонента или осаждение прочих компонентов;

- разделение компонентов жидкости путем физического воздействия (фильтрация, центрифугирование, отстаивание);

 перевод исследуемого вещества в другое агрегатное состояние – испарение, сжижение, кристаллизация;

- гомогенизация пробы (выравнивание размеров частиц под воздействием давления, ультразвука, перемешивания);

- встряхивание пробы с целью предотвращения расслаивания компонентов вследствие различной плотности;

- поддержание в зоне измерений определенной температуры, влажности, давления.

Дисперсия рассеивающих частиц по размерам приводит к наиболее существенным погрешностям в определении показателей взаимодействия излучения с веществом и как следствие определения концентрации вещества в пробе. В настоящее время дисперсность частиц снижается путем гомогенизации пробы – дробления частиц под действием различных физических процессов. Согласно литературным данным, после гомогенизации диаметр частиц жира становится равным 0,3-1 мкм [3].

В молочной промышленности гомогенизация молока широко применяется для измельчения частиц жира, что делает жировую эмульсию более стабильной и легкоусвояемой пищеварительной системой. Процесс гомогенизации вещества предусмотрен при проведении количественных измерений состава молока. Методика гомогенизации молока при проведении фотометрических исследований описана в ГОСТ 5867-90. Молоко нагревается до температуры 40°, гомогенизируется, после чего охлаждается до температуры 20°. Эта процедура требует дополнительного оборудования, занимает сравнительно много времени (15-20 мин), при этом, не обеспечивая высокой степени равномерности распределения частиц по размерам [3].

В молочной промышленности применяют, как правило, клапанные гомогенизаторы. В них молоко, нагретое до температуры плавления жира, под давлением прогоняется через сопло малого диаметра. Вещество имеет высокую скорость и на входе в сопло испытывает механические напряжения, приводящие к дроблению растопленного жира на частицы, диаметр которых зависит от приложенного усилия и диаметра сопла. В измерительном оборудовании такие гомогенизаторы не получили широкого распространения из-за больших габаритов и высокой (для проведения измерений) итоговой дисперсии частиц.

Большее распространение при проведении измерений получили ультразвуковые гомогенизаторы. Принцип работы основан на воздействии на расплавленный жир акустических волн. Эти волны генерируются щупом, погружаемым в гомогенизируемую жидкость. Перепады давления, создаваемого волной, вызывают деформацию частиц, которая, при достижении порогового усилия, может привести к разрушению частицы.

В измерительном приборостроении применение ультразвуковых гомогенизаторов предпочтительнее, чем клапанных, ввиду меньших габаритов, шума, возможности работать с меньшими объемами вещества. Но и они не позволяют добиться равномерного распределения частиц по размерам – остаточная дисперсия составляет порядка 1.8 мкм [4]. Распределение по размерам по объему вещества не является однородным и зависит от расстояния до щупа.

В последнее время широкое распространение получили методы воздействия на частицы микро- и нанометровых размеров лазерным излучением. Разработаны способы разрушения, перемещения, модификации, изменения ориентации частиц в пространстве. Целый ряд современных научных работ посвящен вопросам разработки и применения фотоакустического эффекта для воздействия на наночастицы, биологические клетки и частицы и другие подобные структуры. Фотоакустический эффект заключается в поглощении лазерного излучения жидкостью, и генерации акустической волны за счет того, что среда нагревается неравномерно и, соответственно, неравномерно расширяется [5]. Сгенерированная акустическая волна может быть использована для точного управления перемещения частиц в пространстве, уничтожения некоторых веществ (например, бактерий) и др. В то же время, при соответствующем выборе параметров лазерного излучения, можно сгенерировать акустическую волну с параметрами, близкими к используемым при ультразвуковой гомогенизации молока.

Этот подход обладает рядом преимуществ перед ультразвуковой гомогенизацией.

При лазерном возбуждении ультразвука, гомогенизацию жира можно проводить непосредственно в кювете, в которой производятся измерения. Для гомогенизации может быть использован тот же лазер, что для проведения последующих измерений коэффициента пропускания, но с большей мощностью излучения. Это вносит дополнительные требования в конструкцию лазера (необходима возможность изменения мощности излучения), но по сравнению со стандартным методом существенно сокращает время проведения экспериментов и уменьшает количество дополнительного оборудования. Гомогенизации подвергается именно та область пробы, в пределах которой будет производиться измерения пропускания вещества.

Это позволяет решить вопрос с зависимостью размера частиц от расстояния до источника волны и снижает энергетические затраты.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

При падении лазерного излучения на границу раздела поглощающей и непоглощающей среды наблюдается его интенсивное поглощение, сопровождающееся повышением температуры вещества. Неравномерность нагрева приводит к возникновению перепадов плотности вещества, и, как следствие – к генерации акустической волны [6].

Распределение температуры вдоль направления распространения лазерного луча будет выражаться следующей зависимостью (1):

$$T = (\alpha \cdot E_0 / \rho \cdot c) * e^{-\alpha \cdot z}$$
(1)

где T – температура,  $\alpha$  - показатель поглощения вещества,  $E_0$  - энергия падающего излучения,  $\rho$  - плотность образца, с - теплоемкость образца, z – координата по оптической оси.

Скорость движения частиц среды будет определяться как (2)

$$v = \frac{a}{2} \cdot \beta \cdot T \quad , \tag{2}$$

Интенсивность акустической волны (3) -

$$I = \rho \omega a \left\langle v^2 \right\rangle , \qquad (3)$$

А ее мощность (3) -

$$W_{a\kappa} = \frac{\omega l \beta^2}{4\pi\rho c^2} \cdot (am E_0 e^{-\alpha z}) \qquad (4)$$

Где *β* - коэффициент объемного расширения, *ω* - круговая частота, а - диаметр лазерного луча.

Повышение температуры, сопровождающее поглощение излучения тонким слоем вещества, может быть в первом приближении описано выражением (5):

$$\Delta T = \frac{Q_{nozn}}{c \cdot \rho} \tag{5}$$

Энергия излучения, поглощенная веществом будет определяться из выражения (6) [7]:

$$Q_{norn} = Q_{na\partial} \cdot \rho \cdot \alpha \quad , \tag{6}$$

где  $Q_{nad}$ - энергия падающего на границу раздела излучения,  $\alpha$  - коэффициент поглощения излучения на рабочей длине волны,  $\rho$  - коэффициент отражения излучения от границ раздела «воздух-стекло» и «стеклообразец».

Коэффициент поглощения  $\alpha$  определяется по формуле (7)

$$\alpha = -\lg(\tau)/l \quad , \tag{7}$$

где *т* - показатель пропускания образца, l – толщина слоя образца.

Если интенсивность излучения в пятне подчиняется распределению Гаусса (8),

$$I(r,t) = I_0 \exp(-\frac{t^2}{\tau^2}) f(r)$$
 (8)

где  $I_0$  – интенсивность излучения в точке, определяемой координатой г в момент времени t,  $\tau$  – длительность импульса.

Акустическая волна в среде может быть описана с помощью выражения (9):

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I_0}{\rho c_p} \exp(-\frac{t^2}{\tau^2}) f(r) \quad (9)$$

где, φ – скалярный потенциал поля скоростей, Δ - оператор Лапласа, с0 – скорость света в рассматриваемой жидкости, β – объемный коэффициент температурного расширения, ср – коэффициент теплопроводности.

Выражение для потенциала силы, действующей на частицу, имеет следующий вид (10):

$$U = 2\pi r_s^3 \rho \left(\frac{\bar{p}_i^2}{3\rho^2 c_0^2} f_1 - \frac{\bar{v}_i^2}{2} f_2\right) \quad (10)$$

где  $p_i^{-2}$  и  $v_i^{-2}$  - усредненные по времени квадраты давления и скорости акустической волны в среде, а постоянные  $f_1$  и  $f_2$  определяются из выражений (11, 12):

$$f_1 = 1 - \frac{c_0^2 \rho}{c_s^2 \rho_s}$$
(11)

$$f_2 = 2\frac{\rho_s - \rho}{2\rho_s + \rho} \tag{12}$$

Усредненные по времени потенциальная и кинетическая энергия будут определяться по формулам (13), (14):

$$\overline{V}_i \frac{1}{2} \rho \overline{v}_i^2 \tag{13}$$

$$\overline{T}_{i} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c_{0}^{2}} \overline{p}_{i}^{2}$$
(14)

Тогда сила, действующая на частицу, может быть определена из выражения (15):

$$F = 2\pi r_s^3 \left(\frac{2}{3}f_1 F_1 - f_2 F_2\right) \qquad (15)$$

Графически данная зависимость приведена на рисунке 3.4. Из приведенного графика видно, что при увеличении расстояния от центра лазерного луча до точки наблюдения имеются два экстремума, соответственно, характер воздействия акустического поля на частицу будет изменяться. С увеличением расстояния от нуля сила, действующая на частицу, будет возрастать до некоторого максимального значения. Значение силы уменьшается по модулю до 0, после достижения которого модуль ее снова начинает возрастать, но знак меняется на минус – на частицу начинает действовать сила отталкивания. При дальнейшем увеличении расстояния модуль силы плавно убывает до нуля. Легко видеть, что на некотором расстоянии от лазерного луча до частицы, сила, действующая на последнюю, равно нулю: частица находится в потенциальной яме.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЧАСТИЦЫ ЖИРА

Под воздействием переменного давления, создаваемого акустической волной, происходит деформация частицы жира. Выражение для определения смещения частиц вещества от положения равновесия имеет вид (16):

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$$
(16)

Считается, что механическая прочность биологического объекта, такого как эритроцит или частица жира, позволяет выдерживать деформацию, амплитуда которой составляет до 20% от ее размера. Для частицы с диаметром 10 мкм предельная деформация составит 2 мкм.

Деформация частицы, вызванная акустической волной, может быть в первом приближении определена из соотношения (17):

$$\Delta x = \frac{F}{k^* S} \quad , \tag{17}$$



Рисунок 1. Зависимость силы, действующей на частицу от расстояния до лазерного луча

где  $\Delta x$  - деформация частицы, Р – давление, действующая на частицу, S – площадь сечения частицы, k – вязкость частицы.

Это выражение может применяться для оценочных расчетов в случае, когда речь идет о частицах небольших размеров, масса которых равномерно распределена по объему. Оба эти условия хорошо выполняются в жировых шариках молока.

## Список литературы:

1. *Розенберг Г.В.* Физические основы спектроскопии рассеивающих веществ // Успехи физических наук. 1967. Апрель. Т. 91. Вып. 4.

2. *Александров М.Т.* Лазерная клиническая биофотометрия. Москва: Техносфера, 2008. 583 с.

3. А.М. Шалыгина. Общая технология

молока и молочных продуктов. Москва: Колос С, 2004. 196 pp.

4. *Брусиловский Л.П.* Новые приборы автоматического контроля состава и качества молока и молочных продуктов. Москва: ЦНИИ-ТЭИмясомолпром, 1983 г. 55 рр.

5. Acoustic signals generated by laserirradiated metal nanoparticles Sergey Egerev, Sergey Ermilov, Oleg Ovchinnikov; APPLIED OPTICS / Vol. 48, No. 7 March 2009

6. V.P. Zharov, T.V. Malinsky, R.C. Kurten, J. Phys. D: Appl. Phys., 38, 2662-2674 (2005).

7. *Ошурко В.Б.* Нелинейная лазерная фотоакустика и спектроскопия неоднородных жидких сред Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Москва: МИФИ, 2006. – 46 с.