

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТЯМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ И ЭЛЕМЕНТАМИ КИНОФОРМА

*Николай Юрьевич Никаноров*

Новосибирский приборостроительный завод, 630049, Россия г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук 179/2, заместитель технического директора по оптическим системам и технологиям, тел. (383)236-77-83, e-mail: distorsya@ngs.ru

*Елизавета Геннадьевна Бобылева*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Рассматриваются методы контроля оптических деталей с поверхностями свободной формы и элементами киноформа в производственных условиях. Два из рассматриваемых методов – интерферометрический (с использованием голографических компенсаторов) и профилометрический (с использованием контактных профилометров) – широко известны и используются в производственной практике. Метод бесконтактной профилометрии на основе хроматических конфокальных датчиков для контроля формы поверхности оптических деталей в производственных условиях ранее не применялся.

**Ключевые слова:** оптические детали со свободной поверхностью, киноформ, бесконтактный профилометр, контроль формы поверхности, интерферометр.

## CONTROL METHODS OF OPTICAL DETAILS WITH FREE-FORM SURFACES AND KINIFORM ELEMENTS

*Nikolai Y. Nikanorov*

Novosibirsk Instrument-Making Plant, 179/2, D. Kovalchuk St., Novosibirsk, 63004, Russia, Deputy Technical Director for Optic Systems and Technologies, phone: (383)236-77-83; email: distrosya@ngs.ru

*Elizabeth G. Bobyleva*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)343- 91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Methods of control of optical parts with free-form surfaces and kinoform elements under production conditions are considered. Two of the considered methods - interferometric (using holographic compensators) and profilometric (using contact profilometers) - are widely known and used in industrial practice. The method of non-contact profilometry, based on chromatic confocal sensors to control the surface shape of optical parts in industrial conditions, was not previously applied.

**Key words:** optical parts with a free surface, kinoform, non-contact profilometer, control the shape of the surface, interferometer.

## *Введение*

Технологии производства матричных фотоприемных устройств в настоящее время обеспечивают серийный выпуск матриц с размером пикселя, соизмеримым с длиной волны в рабочем диапазоне спектра. Для видимой и ближней ИК-областей спектра размер пикселя составляет  $1 \times 1$  мкм, а для дальней ИК-области спектра (8–14 мкм) –  $12 \times 12$  мкм [1, 2]. Для того, чтобы реализовать возможности данных матриц по разрешающей способности необходимы оптические системы дифракционно ограниченного качества с высокой апертурой ( $\bar{A} \leq 1:1$ ) [3–5]. При этом необходимо оптимизировать массогабаритные характеристики, а также обеспечивать высокие значения светопропускания. Особенно это важно для оптических систем, работающих в дальней ИК-области спектра [6, 7]. Материалы, используемые при изготовлении оптических деталей для данной области, обладают большими значениями плотности (германий –  $5,33$  г /  $\text{см}^3$ ; селенид цинка –  $5,26$  г /  $\text{см}^3$ ) [8,9], имеют высокие показатели преломления и значения френелевского отражения – от 17 до 36 %. Данные параметры можно уменьшить не только за счет высокоэффективных просветляющих покрытий [10, 11], но и высоким внутренним рассеиванием [12]. Кроме того, экономический фактор и высокая стоимость данных материалов [13] является дополнительным стимулом для снижения материалоемкости оптических схем. В связи с этим можно сказать, что сокращение количества линз в оптической системе является актуальной задачей.

Оптические схемы, построенные на классических сферических линзах, исчерпали свои возможности. А использование для расчетов оптических схем программного продукта, в частности ZEMAX [14], и для обработки оптических деталей станков с ЧПУ [15,16] позволяет изготавливать линзы с асферической формой поверхности, применение которых приводит к сокращению количества деталей в оптических системах.

Использование асферических поверхностей, в том числе и поверхностей свободной формы, позволяет компенсировать монохроматические aberrации, но для этого необходимо применять ахроматические пары (германий – селенид цинка; кремний ФК-И, германий – халькогенидные стекла), что усложняет оптическую схему.

Дальнейшим развитием и упрощением схем для оптических систем, работающих в средней (3–5 мкм) и дальней ИК-областях спектра является нанесение на асферическую поверхность детали элементов киноформа (зон с фазовым сдвигом). Комбинация асферической поверхности с элементами киноформа (гибридная поверхность) позволяет корректировать хроматические aberrации и, в свою очередь, производить расчет оптических систем с использованием одного оптического материала.

Асферические линзы с элементами киноформа широко представлены в таких каталогах как Edmund Optics или ThorLabs [17,18]. Методы расчета и технология изготовления данных линз в статье не рассматриваются. Темой работы является сравнение методов контроля формы поверхности данных линз.

## *Методы контроля оптических деталей с асферической формой поверхности*

Методы контроля деталей с асферической формой поверхности в производственных условиях описаны в работе [19]. Но наиболее востребованными в настоящее время являются:

1. Профилометрический – с использованием контактных профилометров[20];
2. Интерферометрический – с использованием специальных голографических компенсаторов [21].

Данные методы обладают как недостатками, так и преимуществами.

Программное обеспечение современных станков с ЧПУ для обработки оптических деталей, выпускаемое компаниями SatisLohGmbH, OptiTech (SchuncGroup), адаптировано для работы как с результатами, полученными с профилометра, так и с интерферометров по схеме Физо типа Mark II, IV фирмы ZYGO.

Для контроля непрерывных поверхностей данные методы являются достаточно надежными, хотя и обладают рядом ограничений.

Контактный профилометрический метод, во-первых, дает информацию о поверхности в сечении, и для выявления неосесимметричных ошибок необходимо делать измерения в нескольких сечениях; во-вторых, на мягких материалах, таких как селенид цинка и халькогенидные стекла, остается след от индентора (кроме того, это может быть источником погрешности измерения).

Интерференционный метод с использованием голографических компенсаторов лишен данных недостатков, так как является бесконтактным и дает информацию о всей поверхности. Но для реализации данного метода необходимо изготовление голографического компенсатора под каждую асферическую поверхность (метод не является универсальным), поэтому может быть экономически эффективным только для деталей, выпускаемых в условиях средне- и крупносерийного производств, а также для контроля уникальных оптических деталей.

При контроле гибридной асферической поверхности, кроме непосредственно самой формы, необходимо проконтролировать и параметр фазового сдвига, величина которого равна четверти длины волны рабочего диапазона и составляет для дальней ИК-области спектра 3 мкм (12 мкм край рабочей области).

Альтернативой вышеперечисленным методам может быть бесконтактный метод с использованием профилометра на основе хроматических конфокальных датчиков[22]. Особенностью работы данных профилометров является высокая разрешающая способность по оси Z и несколько меньшая в латеральной плоскости. Данные профилометры позволяют восстанавливать форму поверхности за счет сканирования в латеральной плоскости. Преимущество данного метода перед выше перечисленными очевидно: метод бесконтактный, дает информацию о всей поверхности и не требует дополнительной подготовки (метод универсальный). К недостаткам данного метода перед прочими можно отнести низкую ско-

рость сканирования при нанометровом разрешении по оси Z, так как мгновенное поле зрения достаточно мало, что ограничивает применение метода для контроля формы поверхности оптических деталей.

Предлагается сравнить возможности вышеперечисленных методов для контроля оптической поверхности с фазовыми сдвигами на поверхности.

### *Экспериментальная часть*

Для сравнительных испытаний вышеперечисленных методов было изготовлено вогнутое зеркало из алюминиевого сплава АМГ6 (выбор материала определялся минимальными деформациями поверхности после изготовления) диаметром 50 мм и радиусом 100,000 мм в центральной зоне, диаметром 16,6 мм – в средней зоне, ограниченной диаметрами 16,6–33,0 мм, радиусом 100,004 мм и в крайней зоне – радиусом 100,008 мм, при этом ступенька составляла 4 мкм, шероховатость поверхности – Rz 0,08, что обеспечивает возможность применения интерферометра с длиной волны 0,630 мкм.

Данная конфигурация образца для исследования определялась простотой изготовления и интерпретации результатов проведенных измерений.

Для измерения формы поверхности образца перечисленными ранее методами использовались:

- интерферометр OWI150 фирмы OptiTech (Schunc Group);
- контактный профилометр Форм Талесурф фирмы TaylorHobsonLtd;
- бесконтактный профилометр «Сканирующий профилометр на основе хроматических конфокальных датчиков».

Далее приведены результаты проведенных измерений.

На интерферометре было последовательно проведено наведение на бесконечную полосу в соответствующей зоне и измерен радиус данной поверхности. Начальной точкой отсчета послужила поверхность внутренней зоны, и измерение радиуса следующих зон осуществлялось относительно нее.

На рис. 1, 2 и 3 приведены интерферограммы поверхности. При этом на рис. 1 бесконечная полоса – на внутренней зоне, на рис. 2 бесконечная полоса – на средней зоне, а на рис. 3 бесконечная полоса – на внешней зоне. На рис. 3 отчетливо виден астигматизм на поверхности внешней зоны.

Из интерферограмм видно, что значение местной ошибки (PV) не меняется и составляет 0,90 полосы, на фазовой картине виден астигматизм в направлении верхнего правого угла.

С помощью маскирования можно выделять отдельные зоны и вычислять местные ошибки, но данный метод не позволяет определить величину фазового сдвига между зонами.

Методом контактной профилометрии удалось восстановить форму поверхности в трех сечениях (рис. 4, 5 и 6).

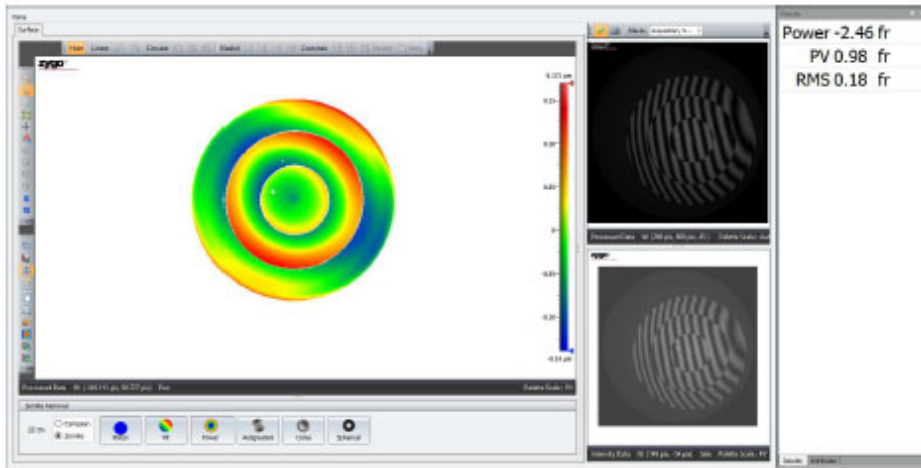


Рис. 1. Интерферограмма поверхности из радиуса 100,000 мм (внутренняя зона)

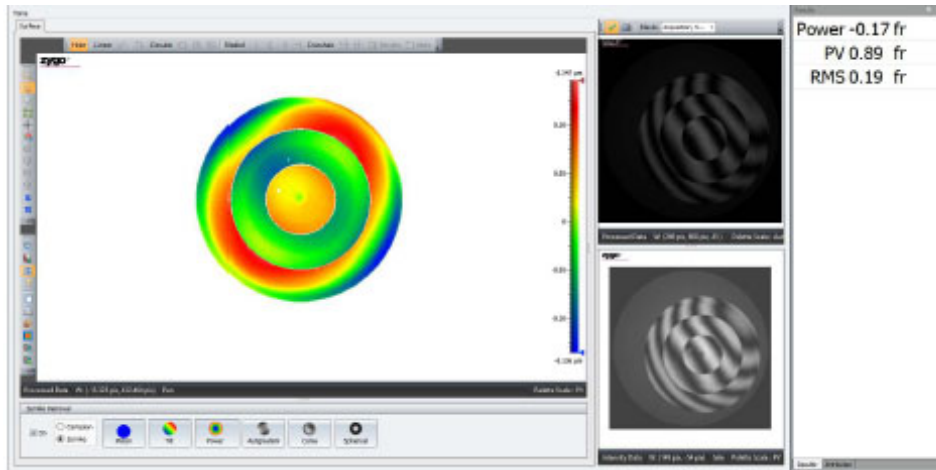


Рис. 2. Интерферограмма поверхности из радиуса 100,008 мм (средняя зона)

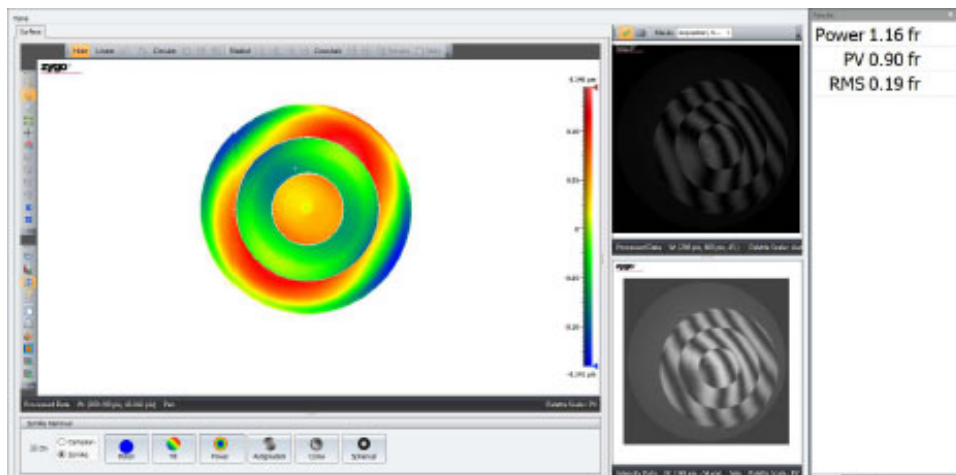
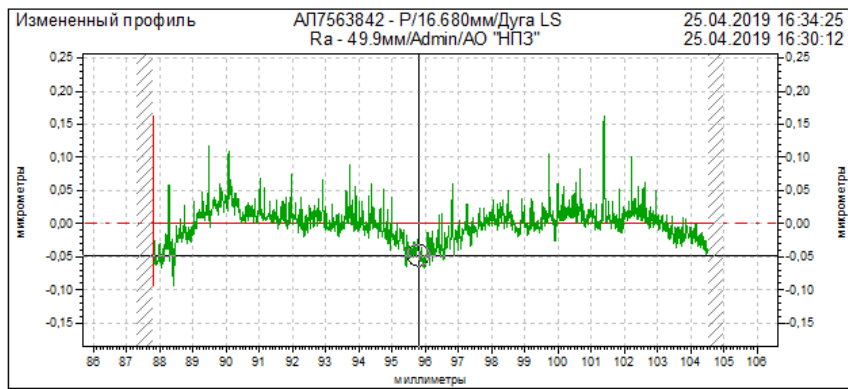
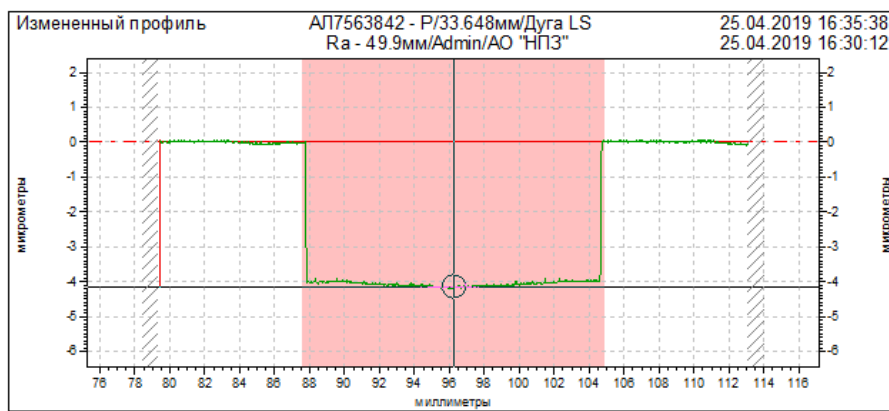


Рис. 3. Интерферограмма поверхности из радиуса 100,021 мм (внешняя зона)



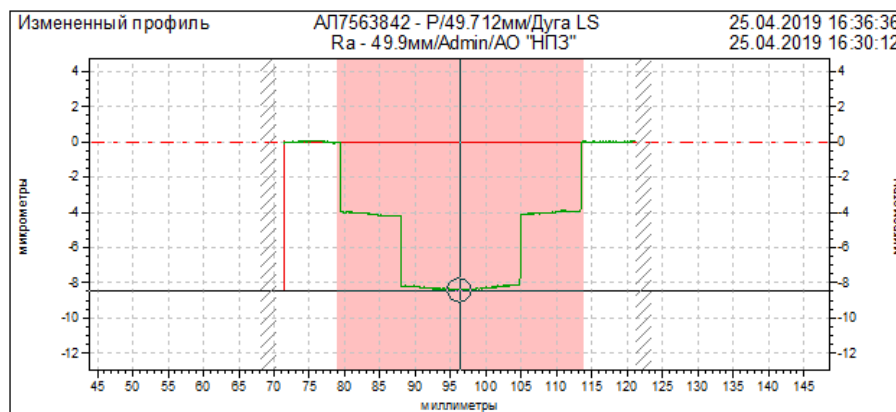
Радиус 99,9555 мм  
 $R_v$  0,0950 мкм  
 $R_t$  0,2582 мкм

Рис. 4. Внутренняя зона



Радиус 100,0035 мм  
 $R_v$  4,1922 мкм  
 $R_t$  4,2845 мкм

Рис. 5. Средняя зона

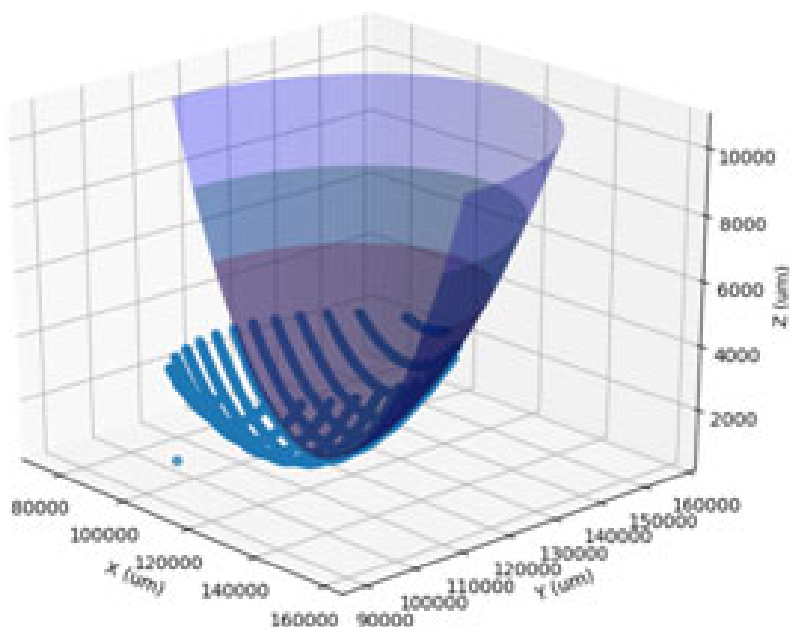


Радиус 100,0218 мм  
 $R_v$  8,4432 мкм  
 $R_t$  8,5420 мкм

Рис. 6. Внешняя зона

Из протоколов измерения рис 4, 5 и 6 видно, что радиусы, измеренные профилетром, совпадают с измерениями, сделанными интерферометром: измеряется величина фазового сдвига между зонами, которая составляет 4 мкм. Но значение отступлений от формы профиля явно завышены и составляют величину суммарного фазового сдвига 8 мкм для внешней зоны. И только для внутренней зоны значение местной ошибки совпадают.

Результат измерений бесконтактным профилетром приведен на рис. 7.



Параметры (мм)	Нижняя сфера	Средняя сфера	Верхняя сфера
R	99961.245	99588.151	99959.349
xс	116643.240	116643.087	116640.951
yс	114186.949	114189.348	114198.286
zс	100789.134	100418.670	100799.212

Рис. 7. Результаты измерений бесконтактным профилетром

Из результатов измерений видно, что данный метод позволяет восстановить форму поверхности, хотя и значения измеренных радиусов не совпадают со значениями, полученными двумя предыдущими методами, но данное обстоятельство скорее связано с недостатками программного обеспечения.

### *Заключение*

В данной работе приведены сравнения нескольких методов контроля оптических поверхностей с элементами киноформ. По результатам сравнения наиболее перспективным методом для контроля асферических поверхностей, в том

числе и с элементами киноформ, является метод бесконтактной профилометрии с применением сканирующих профилометров на основе хроматических конфокальных датчиков.

Можно отметить основные преимущества данного метода:

1. Отсутствует контакт с поверхностью;
2. Возможно восстановление формы поверхности;
3. Не требуются дополнительные голографические корректоры.

Для широкого внедрения метода бесконтактной профилометрии требуется доработка программного обеспечения в целях повышения скорости проведения измерений, что является основным недостатком данного метода.

*Авторы выражают благодарность 07 лаборатории Института Автоматики и Электрометрии, инженеру-технологу цеха опытного производства П. Иштулкину за содействие в проведении измерений.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матрицы тепловизионные [Electronic resource]. – Mode of access <http://npoamb.ru/catalog/matritsy/dld640/>
2. Неохлаждаемые болометрические матрицы [Electronic resource]. – Mode of access <http://astrohn.com/wp-content/uploads/2019/02/naumov-ivk-09-mikrobolometry-2019.pdf>
3. Тарасов, В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа [Текст] / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: ЛОГОС, 2004. – 444 с.
4. Сеник, Б. Н. Современные тенденции в оптических технологиях, применяемых для улучшения выходных характеристик оптических и оптико-электронных систем [Текст] / Б. Н. Сеник, А.Б. Бельский, В.В. Потелов // Оптический журнал. – 2009. – № 8. – С.5-13.
5. Хацевич, Т.Н., Исследование объективов для малогабаритных тепловизионных приборов с позиции модели двухкомпонентного объектива [Текст] / Т. Н. Хацевич, Е. В. Дружкин // Вестник СГУГиТ. – Т.23, №2, 2018. – С. 245-261.
6. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов [Текст]: учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2 изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. – 696 с.
7. Дружкин, Е.В. Реализация общетехнических и специальных требований при разработке малогабаритных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов [Текст] / Е. В. Дружкин, Т. Н. Хацевич // Приборы. – 2018. – № 1. – С. 43-50.
8. Зверев, В.А. Оптические материалы [Текст] / В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова, Т. В. Точилина. – СПб.: НИУ ИТМО, 2009. – 244 с.
9. Оптические материалы и технологии [Текст] / под ред. Н.К. Павлычевой. – Казань: Казанский гос. техн. ун-т им. А.П. Туполева, 2008. – 484 с.
10. Новикова, Ю. А. Исследование оптических констант пленок фторидов в средней ИК-области спектра и синтез на их основе ахроматических просветляющих покрытий [Рукопись]: диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. – СПб., 2015.
11. TYDEX: ИК-покрытия [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.tydex-optics.com/ru/products/coatings/ikpokrytiya/>
12. Германий для оптических применений [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.krasgermanium.com/products/5-Germanii-dlya-opticheskikh-primenenii>.
13. Германий монокристаллический, цена [Electronic resource]. – Mode of access [http://novsib.specstali.ru/catalog/Metallurgicheskoe\\_syrie](http://novsib.specstali.ru/catalog/Metallurgicheskoe_syrie).



14. Leading optical Product Design Software off [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.zemax.com>.
15. Продукция OptoTech [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.optotech.de/ru/produkcija>.
16. Продукция SanisLoh [Electronic resource]. – Mode of access <https://www.satisloh.com/home/precision-optics/overview/>.
17. Продукция Edmund optics [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.edmundoptics.com>
18. Продукция ThorLabs [Electronic resource]. – Mode of access <http://www.ThorLabs.com>.
19. Гурин, Н. А. Контроль асферических поверхностей [Текст] / Н. А. Гурин, Н. Ю. Никаноров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 165 с. – С. 126-129.
20. Каталог продукции Taylor Hobson [Electronic resource]. – Mode of access <https://www.taylorhobson.ru/katalog-produkcii.html>.
21. Полещук, А.Г. Лазерные методы контроля асферической оптики [Текст] / А. Г. Полещук, А. Е. Маточкин // Фотоника. Т.2 – 2011. – С. 39-44.
22. Полещук, А.Г. Прецизионный лазерный технологический комплекс для производства шкал, сеток, фотошаблонов и синтезированных голограмм на основе лазерной трехмерной микро- и нанообработки [Текст] / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. П. Бессмельцев, Ю. Н. Никоноров, А. Л. Карван, А. Г. Верхогляд // ГОЛОЭКСПО-2015. XII Междунар. конференция., 12–15 октября 2015 г., Казань : сб. материалов. – Казань : 2015. – С. 38-42.

© Н. Ю. Никаноров, Е. Г. Бобылева, 2020