

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА В ПЛОСКОСТИ УСТАНОВКИ
МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Е. Е. МАЙОРОВ^{1*}, В. В. КУРЛОВ¹, Ю. М. БОРОДИНСКИЙ²,
А. В. ДАГАЕВ³, И. С. ТАЮРСКАЯ⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
*majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, Россия

³ Ивановский гуманитарно-технический институт (филиал)
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,
Ивангород, Россия

⁴ Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследованы особенности функционирования экспериментальной установки, основанной на применении двухчастотного лазерного излучения по методу двух экспозиций голографической интерферометрии. Установка предназначена для определения величины перемещения объекта вдоль оси *OX* в плоскости его установки. Метод голографической интерферометрии обеспечивает длительное хранение информации на фотоносителях, позволяет добиться максимального контраста интерференционной картины и качественно реконструировать волновые фронты. Представлены внешний вид, оптическая схема и технические характеристики экспериментальной установки. Получены выражения для определения величины перемещения объекта и погрешностей измерения для каждого перемещения. Приведены изображения, подтверждающие существование интерференционного поля для каждого перемещения.

Ключевые слова: когерентная оптика, голографическая интерферометрия, длина волны излучения, апертура, погрешность измерения, волновой фронт, поляризационный светоделитель, коллиматор

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Курлов В. В., Бородинский Ю. М., Дагаев А. В., Таюрская И. С. Экспериментальное определение величины перемещения объекта в плоскости установки методом голографической интерферометрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 3. С. 268—275. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-268-275.

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF AN OBJECT DISPLACEMENT MAGNITUDE
IN THE INSTALLATION PLANE
USING THE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY METHOD**

E. E. Maierov^{1*}, V. V. Kurlov¹, Yu. M. Borodyansky²,
A. V. Dagaev³, I. S. Tayurskaya⁴

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
*majorov_ee@mail.ru

² Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, Russia

³ Ivangorod Humanitarian and Technical Institute
(branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation),
Ivangorod, Russia

⁴ St. Petersburg University of Management Technologies and Economics,
St. Petersburg, Russia

Abstract. The features of the functioning of an experimental setup based on application of two-frequency laser radiation using the method of two exposures of holographic interferometry are studied. The installation is intended to determine the amount of movement of an object along the *OX* axis in the plane of its installation. The holographic interferometry method ensures long-term storage of information on photo carriers, allows for maximum contrast of the interfe-

rence pattern and high-quality reconstruction of wave fronts. The appearance, optical design and technical characteristics of the experimental setup are presented. Expressions are obtained to determine an object displacement magnitude and measurement errors for each displacement. Images are shown confirming the existence of an interference field for each displacement.

Keywords: coherent optics, holographic interferometry, radiation wavelength, aperture, measurement error, wavefront, polarization beam splitter, collimator

For citation: Maiorov E. E., Kurlov V. V., Borodyansky Yu. M., Dagaev A. V., Tayurskaya I. S. Experimental determination of an object displacement magnitude in the installation plane using the holographic interferometry method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 3. P. 268—275 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-268-275.

Введение. Оптические измерения — высокоточный и достоверный способ получения информации, обеспечивающий решение различных задач в микроэлектронике, оптике и метрологии. В научной практике для изучения движений веществ в различном агрегатном состоянии используется широкий класс методов контроля и технических средств. Ведущее место занимают методы когерентной оптики, среди которых особого внимания заслуживают методы и средства голографической интерферометрии [1—8].

Анализ научной литературы показал, что голографическая интерферометрия обладает уникальными возможностями для исследования объектов в динамических процессах [9, 10]. Технические средства голографической интерферометрии позволяют проводить измерения в статистических и динамических процессах, анализировать волновые фронты в разные моменты времени, получать данные качественного и количественного характера о структуре интерференционных полей, а также воспроизводить трехмерное изображение объекта [11, 12].

На сегодняшний день в голографической интерферометрии достигнуты определенные успехи при использовании метода двух экспозиций. Этот метод обеспечивает длительное хранение информации на фотоносителях, прост в реализации, позволяет добиться максимального контраста интерференционной картины и качественно реконструировать волновые фронты [13, 14]. Получены высокие результаты в методике записи голографической интерферограммы, осуществлен переход на новый уровень при количественном и качественном объяснении экспериментальных результатов с использованием компьютерных технологий, а также достигнуты успехи в создании приборов и комплексов оптической обработки записанных изображений на фоторегистрирующей среде [15, 16].

На основе анализа существующих решений по извлечению данных из фоторегистрирующих сред можно выделить группу приборов и комплексов, которые основаны на преобразовании фазовых параметров интерференционного поля в фазовые параметры электрического сигнала, что делает эти технические средства высокоточным и информативным инструментом получения информации [17, 18]. Такие средства имеют очень малую погрешность измерений при достаточно большом диапазоне определяемых величин.

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, в основе которых лежат методы голографической интерферометрии, успешно используются в машиностроении, медицине, биологии, научных исследованиях для контроля и диагностики материалов [18, 19]. В последние годы российским ученым удалось решить задачу настройки интерференционных полос в технике двухопорной голографии. Конструктивно эти технические средства выполнены таким образом, что при использовании второго опорного пучка воспроизведение волнового фронта не изменяется, а значит, точность измерений при считывании информации не снижается. Еще одна важная особенность этих приборов и комплексов заключается в том, что в процессе измерений появляется возможность контролировать большие величины смещений исследуемых объектов.

Представляет интерес исследование различных перемещений объекта не только при нормальном перемещении, но и в плоскости экспериментальной установки. В настоящей

статье исследованы особенности функционирования экспериментальной установки, основанной на методе двух экспозиций голографической интерферометрии и предназначенной для определения величины перемещения объекта вдоль оси OX в плоскости его установки. Для подтверждения интерференционной картины получены результаты наблюдений интерференционного поля для поступательного движения объекта с плоской поверхностью на 150, 600 и 1000 мкм.

Метод и объект исследования. В качестве объекта исследования использовалась медная пластина с размерами записывающей плоскости 90×90 мм². Для получения интерферограмм применялись фотографические высокоразрешающие пластинки (голографические фотоматериалы на основе галогенидов серебра) U08M.

Экспериментальная голографическая интерференционная установка, внешний вид которой показан на рис. 1, используется для исследования поступательных движений объекта в своей плоскости и в направлении, перпендикулярном плоскости, а также возможности вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей.

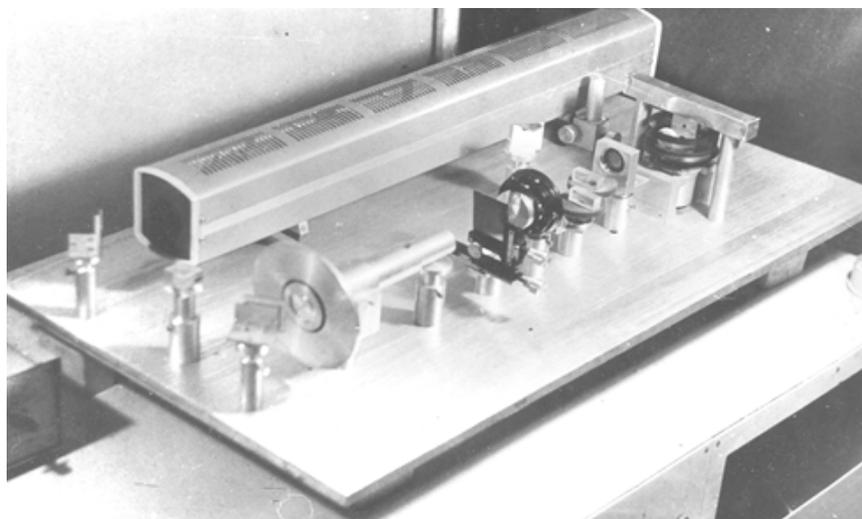


Рис. 1

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2, где 1 — лазер; 2, 5, 5', 11 — зеркала; 3 — блок формирования двухчастотного излучения; 4, 4' — светоделители; 6, 7 — акустооптические модуляторы; 8, 9 — ВЧ-генераторы; 10, 16 — полуволновые пластинки; 12, 14 — оборачивающие призмы; 13 — голограмма; 15 — интерферометр сдвига; 17, 18 — поляризаторы; 19 — линза; 20, 21 — фотоприемники; 22, 23 — усилители; 24 — измеритель разности фаз; блоки, выделенные на схеме пунктиром, — дублирующие элементы.

Воспроизведение волновых фронтов, записанных на фотопластинке, осуществлялось с использованием излучения лазера 1 (ЛГ-79). Принцип гетеродинной интерферометрии был реализован с применением двухчастотного излучения, формируемого блоком 3. Последний построен на основе интерферометра Маха — Цендера, в плечах которого размещены акустооптические модуляторы 6 и 7 (использовались устройства типа МЛ-201). Модуляторы возбуждались напряжением ВЧ-генераторов 8 и 9. Сформированное двухчастотное излучение освещало голограмму 13.

Для проведения фазовых измерений необходимо наличие двух каналов — опорного и измерительного. В этой схеме сигнал опорного канала формировался из света, прямо прошедшего интерферограмму 13. Такой подход целесообразно использовать в случае, когда геометрия освещения фотопластинки в процессе эксперимента остается неизменной. В противоположном случае для формирования опорного сигнала использовалось излучение, отраженное от светоделителя 11. Измерительный канал формировался в направлении распространения света, дифрагированного на интерферограмме.

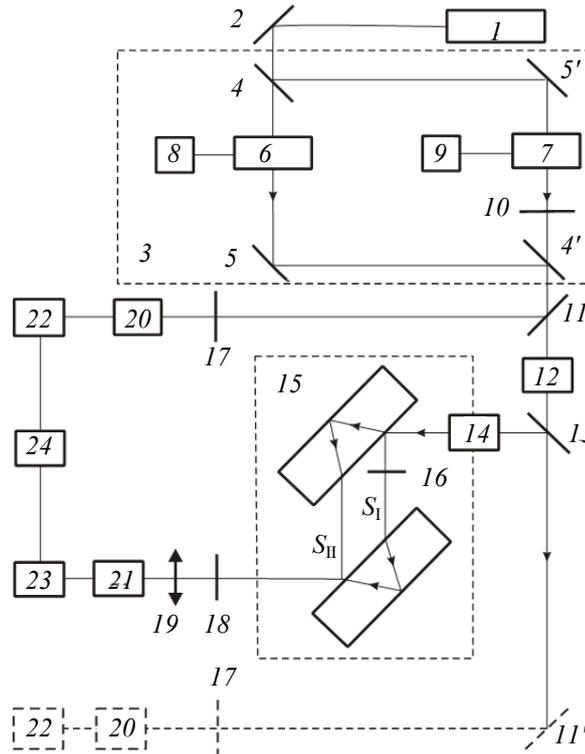


Рис. 2

В целях обеспечения повышенной стабильности параметров возбуждающего сигнала в ВЧ-генераторах использовались кварцевые резонаторы с частотами $f_8 = 42\,002$ кГц и $f_9 = 42\,105$ кГц.

Электрические сигналы с выходов фотоприемников 20 и 21 обоих каналов после усиления подаются на входы измерителя разности фаз (использовался прибор Ф2-16). Резонансные усилители 22, 23 настроены на частоту интерференционного сигнала 103 кГц.

При сканировании интерферограммы фаза информационного сигнала изменяется согласно изменению смещения. Фаза опорного сигнала не меняется независимо от величины и ориентации контролируемого объекта, поэтому показания измерителя разности фаз изменяются в соответствии с изменением вектора смещения.

Технические параметры экспериментальной установки

Источник излучения.....	He—Ne-лазер (ЛГ-79)
Длина волны излучения, мкм.....	0,6328
Диапазон измерений смещений, мкм.....	1500...0,01
Апертура освещения, рад.....	0,1
Погрешность измерений, мкм.....	0,001

Экспериментальные результаты. Интерферограммы для наиболее характерного перемещения объекта в плоскости его установки представлены на рис. 3: $a—b$ — перемещение на величину d , равную 150, 600 и 1000 мкм соответственно.

Записи интерферограмм осуществлялись с помощью металлического столика с микрометрическими подвижками. В процессе воспроизведения голографическая пластинка U08M освещалась лазерным лучом, диаметр которого равен 1 мм, при этом наблюдались интерференционные картины. Как видно по фотографиям, интерференционные поля были классическими для данного вида перемещения.

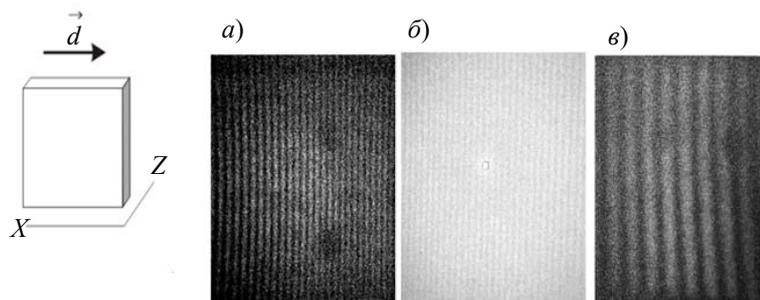


Рис. 3

На фоторегистрирующей пластинке U08M были записаны линейные перемещения исследуемого объекта. Для независимого контроля использовался датчик линейных перемещений 1МИГ с ценой деления 1 мкм.

Величина перемещения определялась по следующим формулам:

$$\Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha_1; \quad \Phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha_2, \quad (1)$$

где α_1, α_2 — углы освещения; Φ_1, Φ_2 — параметры разности фаз, λ — длина волны излучения.

Для объяснения существования интерферограмм была решена система уравнений (1) и определена величина перемещения

$$d = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\frac{2\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}. \quad (2)$$

Экспериментальные результаты определения величины перемещения объекта на 150, 600 и 1000 мкм приведены на рис. 4, а—в.

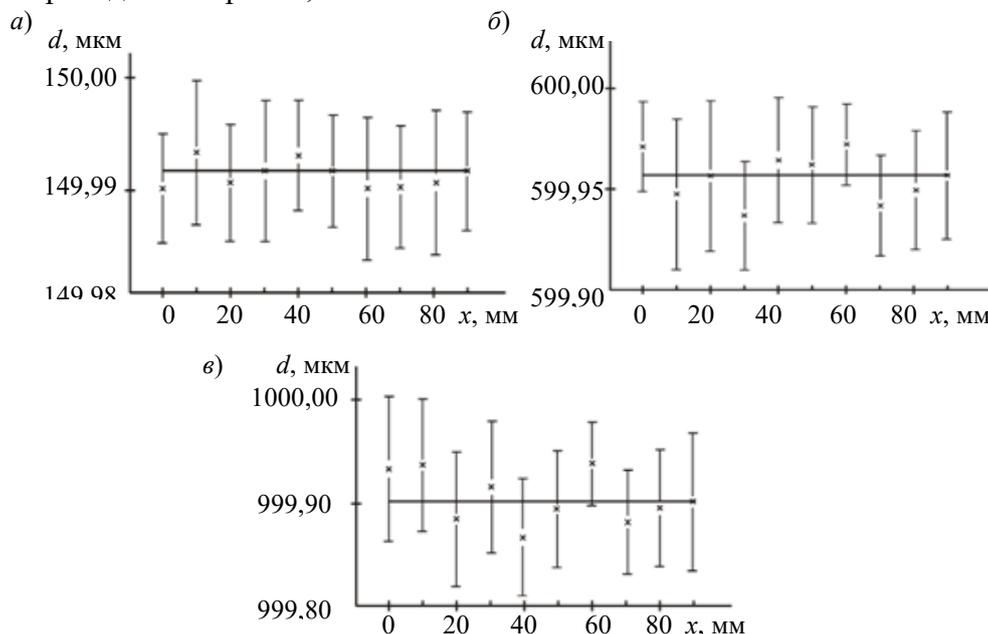


Рис. 4

Приведенные результаты хорошо согласуются с данными датчика линейных перемещений 1МИГ. Как следует из приведенных графиков, погрешность от среднего значения для $d = 150$ мкм не превышает 0,01 мкм, для $d = 600$ мкм — 0,05 мкм, для $d = 1000$ мкм — 0,1 мкм.

Заключение. Реализована возможность перемещения поляризационного светоделителя для изменения угла освещения и получены интерферограммы перемещений объекта в плоскости установки на 150, 600 и 1000 мкм. Получено выражение для величины перемещения. Анализ графиков показывает, что погрешности измерений для каждого перемещения различны. Результаты исследования могут представлять интерес для оптико-физических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 340 с.
2. *Островский Ю. И., Щетинов В. П., Яковлев В. В.* Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 248 с.
3. *Коломийцев Ю. В.* Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
4. *Котов И. Р., Майорова О. В., Прокопенко В. Т.* Измерение локальных наклонов диффузно отражающих объектов при использовании метода голографической интерферометрии. // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 4. С. 32—34.
5. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504с.
6. *Малакара Д.* Оптический производственный контроль / Пер. с англ.; Под ред. *А. Н. Соснова*. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
7. *Майоров Е. Е., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Курлов В. В., Таюрская И. С.* Исследование оптических поверхностей плосковыпуклых линз экспериментальной интерференционной установкой с дифрагированным опорным волновым фронтом // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 1. С. 43—53.
8. *Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Пушкина В. П.* Математическое моделирование выходного сигнала при разной геометрии апертур фотоприемников интерференционной системы анализа интерферограмм // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 4. С. 313—319. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319.
9. *Майоров Е. Е.* Исследование выходного интерференционного сигнала в фазоизмерительной системе // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. 4-й Всерос. науч. конф., 18—22 апр. 2023 г. СПб: ГУАП, 2023. С. 56—60.
10. *Майоров Е. Е.* К вопросу о погрешности измерений в сдвиговой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. 4-й Всерос. науч. конф., 18—22 апр. 2023 г. СПб: ГУАП, 2023. С. 61—64.
11. *Майоров Е. Е.* Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. 4-й Всерос. науч. конф., 18—22 апр. 2023 г. СПб: ГУАП, 2023. С. 65—68.
12. *Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А.* Реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 2. С. 75—83.
13. *Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А.* Экспериментальная измерительная система для контроля поверхностей корпуса воздушного судна // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 5. С. 430—436. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436.
14. *Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е.* Экспериментальное исследование фазоизмерительной установки обработки спеклограмм // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 109—112. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112.
15. *Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Курлов В. В., Гулиев Р. Б., Таюрская И. С.* Контроль плоской поверхности отражателя на основе $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{ZrO}_2$ экспериментальной установкой, построенной на базе интерферометра Физо // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 132—137. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-132-137.
16. *Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Костин Г. А.* Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5. (275). С. 51—54.
17. *Майоров Е. Е., Бородянский Ю. М., Курлов В. В., Таюрская И. С., Пушкина В. П., Гулиев Р. Б.* Пространственное микросканирование поверхности плоскопараллельных стеклянных пластинок интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 8. С. 688—695. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695.
18. *Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Курлов В. В., Пушкина В. П., Бородянский Ю. М., Таюрская И. С.* Экспериментальное исследование косметических масел низкокогерентным интерференционным радаром // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 585—590. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-585-586.

19. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А., Баранов Н. Е. Использование излучения с малой временной когерентностью для исследования поверхности щелевых закрылок на крыле самолета // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 577—581. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-577-578.

Сведения об авторах

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Юрий Михайлович Бородинский** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра безопасности информационных систем; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
- Александр Владимирович Дагаев** — канд. техн. наук, доцент; Ивановский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий; E-mail: adagaev@list.ru
- Ирина Соломоновна Таюрская** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики, кафедра информационных технологий и математики; E-mail: tis_ivesepe@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023; одобрена после рецензирования 16.11.2023; принята к публикации 14.01.2024.

REFERENCES

- Ostrovsky Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V. *Golograficheskaya interferometriya* (Holographic Interferometry), Moscow, 1977, 340 p. (in Russ.)
- Ostrovsky Yu.I., Shchepinov V.P., Yakovlev V.V. *Golograficheskiye interferentsionnyye metody izmereniya deformatsiy* (Holographic Interference Methods for Strain Measurement), Moscow, 1988, 248 p. (in Russ.)
- Kolomiytsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296p. (in Russ.)
- Kotov I.R., Mayorova O.V., Prokopenko V.T. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 4(53), pp. 32–34. (in Russ.)
- Vest Ch.M. *Holographic Interferometry*, NY, Wiley, 1979.
- Malacara D., ed., *Optical Shop Testing*, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Maierov E.E., Borodyansky Y.M., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S. *Nauchnoe Priborostroenie*, 2023, no. 1(33), pp. 43–53. (in Russ.)
- Maierov E.E., Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliyev R.B., Dagaev A.V., Pushkina V.P. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 4(66), pp. 313–319, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-4-313-319. (in Russ.)
- Maierov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Collection of Reports of the Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 56–60. (in Russ.)
- Maierov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Collection of Reports of the Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 61–64. (in Russ.)
- Maierov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Collection of Reports of the Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 65–68. (in Russ.)
- Maierov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie*, 2023, no. 2(33), pp. 75–83. (in Russ.)
- Maierov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 5(66), pp. 430–436, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436. (in Russ.)
- Kostin G.A., Chernyak T.A., Maierov E.E. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2023, no. 4, pp. 109–112, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112. (in Russ.)
- Maierov E.E., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Kurlov V.V., Guliyev R.B.O., Tayurskaya I.S. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2023, no. 4, pp. 132–137, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-132-137. (in Russ.)
- Maierov E.E., Chernyak T.A., Kostin G.A. *Instruments*, 2023, no. 5(275), pp. 51–54. (in Russ.)
- Maierov E.E., Borodyansky Yu.M., Kurlov V.V., Tayurskaya I.S., Pushkina V.P., Guliyev R.B. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 8(66), pp. 688–695, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-8-688-695. (in Russ.)
- Maierov E.E., Arefiev A.V., Kurlov V.V., Pushkina V.P., Borodyansky Yu.M., Tayurskaya I.S. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2023, no. 7, pp. 585–590, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-585-586 (in Russ.)

19. Maiorov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A., Baranov N.E. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2023, no. 7, pp. 577–581, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-577-578. (in Russ.)

Data on authors

- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: maiorov_ee@mail.ru
- Victor V. Kurlov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovations and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Yuriy M. Borodyansky** — PhD, Associate Professor; Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Information Systems Security; E-mail: borodyanskyum@gmail.com
- Alexander V. Dagaev** — PhD, Associate Professor; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute, Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mathematics, Informatics and Information Customs Technologies; E-mail: adagaev@list.ru
- Irina S. Tayurskaya** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of Management Technologies and Economics, Department of Information Technologies and Mathematics; E-mail: tis_ivesep@mail.ru

Received 19.10.2023; approved after reviewing 16.11.2023; accepted for publication 14.01.2024.