

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

## METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 681.787

DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Е. Е. Майоров<sup>1\*</sup>, Г. А. Костин<sup>2</sup>, В. В. Курлов<sup>1</sup>, Н. Е. Баранов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации  
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

\* majorov\_ee@mail.ru

**Аннотация.** Интерференционным методом исследованы поверхности фрагментов киля Airbus A 320, Boeing 737-700 и Ту-214. Приведена функциональная схема измерительной установки. Получены изображения микрорельефа поверхностей и измерены расстояния до поверхности при ее линейном перемещении вдоль оси OX относительно оптического зрачка с шагом 100 мкм, в каждой точке выполнялось 20 измерений.

**Ключевые слова:** интерференционная установка, летательный аппарат, динамическая поверхность, шероховатость, рельеф, диаметр светового пятна

**Ссылка для цитирования:** Майоров Е. Е., Костин Г. А., Курлов В. В., Баранов Н. Е. Исследование динамической поверхности летательного аппарата интерференционным методом // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 8. С. 722–726. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.

### STUDY OF THE DYNAMIC SURFACE OF AN AIRCRAFT BY THE INTERFERENCE METHOD

E. E. Maiorov<sup>1\*</sup>, G. A. Kostin<sup>2</sup>, V. V. Kurlov<sup>1</sup>, N. E. Baranov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State University for Civil Aviation, St. Petersburg, Russia

\* majorov\_ee@mail.ru

**Abstract.** The surfaces of the fin fragments of the Airbus A 320, Boeing 737-700 and Tu-214 are investigated using the interference method. The functional diagram of the measuring setup is given. The images of the surface microrelief are obtained and the distances to the surface are measured during its linear movement along the OX axis relative to the optical pupil with a step of 100  $\mu\text{m}$ , 20 measurements are performed at each point.

**Keywords:** interference setup, aircraft, dynamic surface, roughness, relief, light spot diameter

**For citation:** Maiorov E. E., Kostin G. A., Kurlov V. V., Baranov N. E. Study of the dynamic surface of an aircraft by the interference method. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 8. P. 722–726 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-8-722-726.

Исследование формы поверхности занимает важное место в решении многих задач метрологии. Оптические измерения являются наиболее универсальными методами исследований [1], обеспечивая высокую точность [2]. Известно, что чувствительность и точность измерений этих методов составляет порядка десятых микрометра [3]. Развитие микроэлектроники, робо-

тотехники, информационных технологий позволило увеличить точность, чувствительность, диапазон измерений в десятки, а порой и в сотни раз [4]. Проанализировав методы измерений поверхности, можно с большой уверенностью сказать о том, что оптические измерения выгодно отличаются убедительностью, надежностью, наглядностью. Поэтому их роль в аэрокосмической области и авиации становится первостепенной и незаменимой [5].

Авиационная промышленность огромное внимание уделяет созданию современных летательных аппаратов [6], а потому внедряются высокие технологии технической эксплуатации летательного аппарата. По состоянию сложных систем и агрегатов (двигатель, навигационная аппаратура, система управления и т. д.) воздушного судна необходимо иметь достоверные данные. Значимым фактором является надежность и эффективность обслуживания летательного аппарата для обеспечения безопасности полетов.

При проектировании воздушного судна много времени уходит на усовершенствование аэродинамических характеристик [7]. В частности, детальному исследованию подлежат динамические поверхности (отдельные области крыла, фюзеляж, стабилизаторы, киль и т. д.), которые позволяют регулировать ориентацию воздушного судна в полете и контролировать ее [8, 9]. От того, из какого материала изготовлена динамическая поверхность, каковы геометрия и шероховатость поверхности, зависят устойчивость и управляемость самолета. Известно, что производители авиационной техники стремятся максимально уменьшить трение на динамических поверхностях, а значит, класс чистоты поверхности (класс шероховатости) должен быть относительно высоким. Поэтому интерес представляет получение данных о геометрических параметрах одной из динамических поверхностей разных летательных аппаратов.

Цель настоящей работы — интерференционным методом определить шероховатость поверхности фрагмента кия при ее линейном перемещении вдоль оси  $OX$  относительно оптического зрачка с шагом 100 мкм. В качестве объектов исследования использовались поверхности фрагментов (анализируемый участок поверхности  $2 \times 2$  мм) кия различных летательных аппаратов — Airbus A 320, Boeing 737-700 и Ту-214 (материалы были предоставлены техническим отделом авиационного завода).

Киль представляет собой часть хвостового оперения, которая расположена в нормальной плоскости летательного аппарата, он обеспечивает устойчивость и управляемость во время полета. Внешняя поверхность кия служит для придания обтекаемой формы и, как правило, выполняется из отдельных листов алюминиевого сплава.

Для проведения экспериментальных исследований была применена интерференционная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1 (1, 11 — источники излучения; 2 — микрообъектив; 3 — светоделитель; 4 — объект; 5, 7, 8 — зеркала; 12 — фотоприемники; 9 — модулятор; 10 — дифракционные решетки; 13 — датчик скорости; 14 — блок электронной обработки сигналов; 15 — плоскопараллельная пластина; PC — компьютер).

Источник излучения — диод белого света  $I$  с длиной когерентности  $l_c = 1$  мкм. Объектив 2 ( $12\times$ ,  $f = 21,5$  мм,  $A = 0,1$ ) фокусирует излучение источника на контролируемую поверхность объекта 4 и опорную поверхность 8. При контроле рельефа поверхности фиксировалось мак-

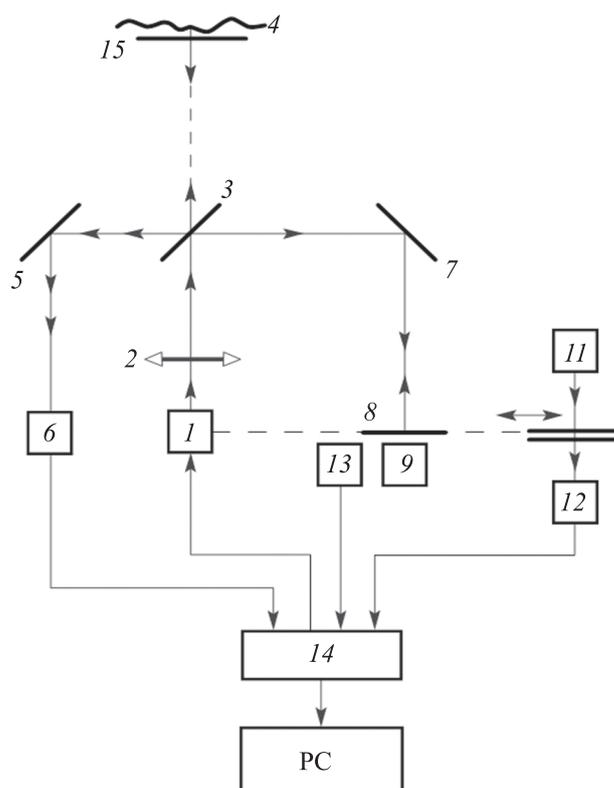


Рис. 1

симальное значение сигнала фотодиодом 6, когда наступал момент равенства оптических длин в ветвях интерферометра. Изменение рельефа поверхности приводило в движение зеркало 8, которое было закреплено на специальном механизме. Электромагнит 9 приводил в движение этот механизм.

При перемещении 8 изменение в опорной ветви фиксировалось двумя голографическими решетками 10, одна из которых неподвижна, а другая двигалась вместе с 8. Шаг дифракционных решеток — 0,8 мкм. Решетки освещались светодиодом 11, а сигнал фиксировался фотодиодом 12.

При динамических исследованиях, к которым относятся измерения данных объектов, необходимо обеспечить независимость результатов измерений от возможных смещений контролируемой поверхности во время сканирования. Проще всего это осуществить, если в качестве базовой плоскости отсчета использовать поверхность плоскопараллельной пластины, которая жестко прикреплена к контролируемой поверхности. В этом случае измеряемой величиной является зазор между двумя указанными поверхностями. Также в этом случае нет необходимости во втором интерферометре, поскольку опорный сигнал формируется светом, отраженным от поверхности плоскопараллельной пластины.

Интерференционное устройство позволяло контролировать расстояние до поверхности, которое соответствовало максимуму интерференционного сигнала. Искомой величиной являлся зазор между плоскопараллельной пластинкой и контролируемой поверхностью. Специальное программное обеспечение интерферометра обеспечивало возможность демонстрировать наблюдаемые изображения и переводить их в трехмерную копию.

На рис. 2 представлен микрорельеф фрагмент поверхности кия: а — Airbus A 320; б — Boeing 737-700; в — Ту-214.

Поверхность кия ориентировалась относительно светового луча под углом  $\theta = 0$ . Для этого угла измерялось расстояние до поверхности, линейно перемещающейся вдоль оси  $Ox$  относительно оптического зрачка. Поверхность смещалась относительно оптического зрачка с шагом 100 мкм, и для каждой точки выполнялось 20 измерений. Контроль осуществлялся по классической методике: смещение интерференционной картины на одну полосу соответствовало отклонению от плоскости на  $\lambda/2 \approx 0,3$  мкм.

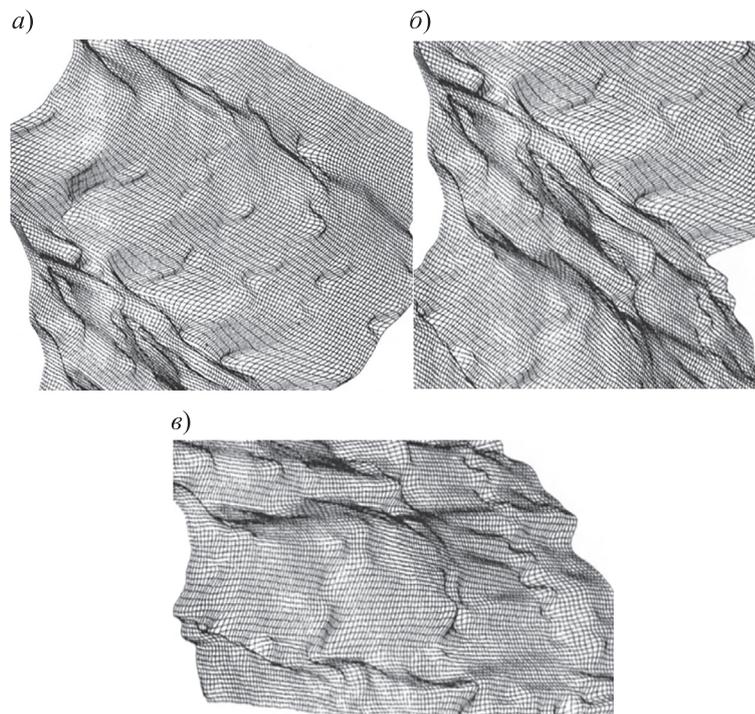


Рис. 2

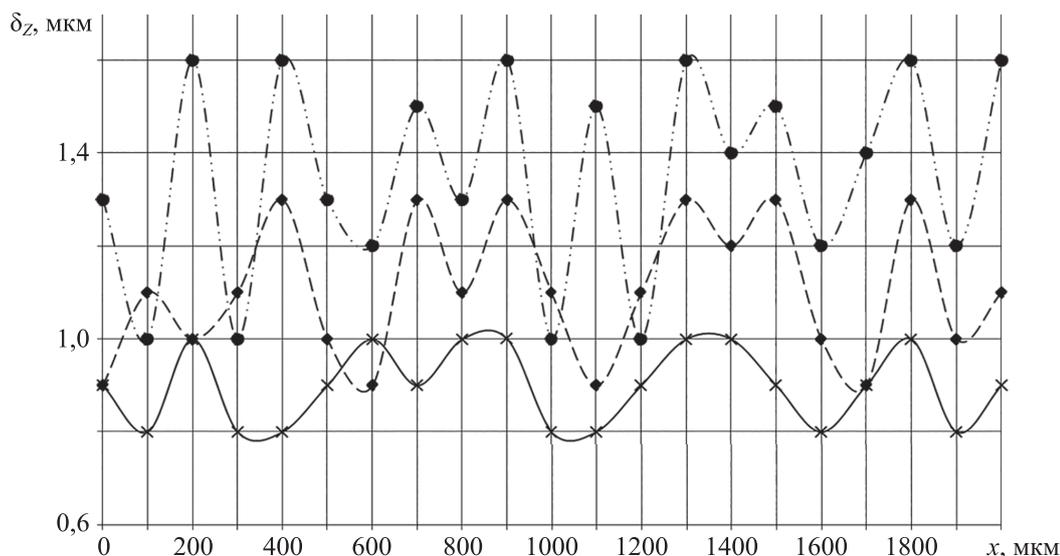


Рис. 3

Результаты измерения расстояния до поверхности кия при ее линейном перемещении вдоль оси  $Ox$  приведены на рис. 3 ( $\times$  — рельеф Airbus A 320;  $\blacklozenge$  — рельеф Boeing 737-700;  $\bullet$  — рельеф Tu-214). Как следует из графических зависимостей, поверхности имеют микронеровности в пределах измеряемой длины 2000 мкм. Проанализировав кривые, можно констатировать, что поверхности хорошо обработаны. Видно, что высота рельефа  $\delta_z$  для каждой поверхности различается. Наибольшие значения зафиксированы у поверхности кия Boeing 737-700, а наименьшие — у Tu-214, видимо, это обусловлено особенностями обработки поверхности.

С использованием специализированного программного обеспечения интерференционного устройства в работе получены компьютерные изображения поверхностей. Измерен рельеф поверхности при нормальном зондировании (расстояние до поверхности 100 мм, диаметр светового пятна на поверхности 10 мкм). Показано, что отечественные технологии обработки поверхностей, в частности в авиационной промышленности, не уступают зарубежным аналогам, а в чем-то превосходят (исследованные поверхности кия Airbus A 320 и Boeing 737-700 можно отнести к шестому классу шероховатости, а Tu-214 — к седьмому). Представленная работа может быть интересна техническим отделам авиационных заводов при изготовлении динамических поверхностей летательного аппарата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородинский Ю. М., Майоров Е. Е., Петрова Е. А., Попова Е. В., Курлов В. В., Удахина С. В. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5 (263). С. 3–7.
2. Майоров Е. Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Четвертая Всерос. науч. конф. (СПб, 18–22 апреля 2023 г.): сб. докл. СПб: ГУАП, 2023. С. 65–68.
3. 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.
4. Майоров Е. Е., Бородинский 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.
5. 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. Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 577–581. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-577-578.
6. Бюшгенс Г. С., Студнев Р. В. Аэродинамика самолета. Динамика продольного и бокового движения. М.: Машиностроение, 1979. 354 с.

7. Мышкин Л. В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 304 с.
8. Байдаков В. Б., Клумов А. С. Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 342 с.
9. Котик М. Г. Динамика взлета и посадки самолетов. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; доцент; E-mail: majorov\_ee@mail.ru
- Геннадий Александрович Костин** — докт. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, кафедра прикладной математики и информатики; проректор по науке и цифровизации; E-mail: ga\_kostin@spbguga.ru
- Виктор Валентинович Курлов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества; доцент; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Николай Евгеньевич Баранов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, кафедра аэродинамики и динамики полета; заведующий кафедрой; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.12.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 19.06.2024.

#### REFERENCES

1. Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. *Instruments*, 2022, no. 5(263), pp. 3–7. (in Russ.)
2. Maiorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Control of Complex Systems), Collection of reports of the Forth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 65–68. (in Russ.)
3. Maiorov 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.)
4. Maiorov 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.)
5. 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.)
6. Byushgens G.S., Studnev R.V. *Aerodinamika samoleta. Dinamika prodol'nogo i bokovogo dvizheniya* (Aerodynamics of the Aircraft. Dynamics of Longitudinal and Lateral Motion), Moscow, 1979, 354 p. (in Russ.)
7. Myshkin L.V. *Prognozirovaniye razvitiya aviatsionnoy tekhniki: teoriya i praktika* (Forecasting the Development of Aviation Technology: Theory and Practice), Moscow, 2006, 304 p. (in Russ.)
8. Baydakov V.B., Klumov A.S. *Aerodinamika i dinamika polota letatel'nykh apparatov* (Aerodynamics and Flight Dynamics of Aircraft), Moscow, 1979, 342 p. (in Russ.)
9. Kotik M.G. *Dinamika vzleta i posadki samoletov* (Dynamics of Takeoff and Landing of Aircraft), Moscow, 1984, 256 p. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHORS

- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics; E-mail: majorov\_ee@mail.ru
- Gennady A. Kostin** — Dr. Sci, Associate Professor; St. Petersburg State University for Civil Aviation, Department of Applied Mathematics and Computer Science; Vice-Rector for Science and Digitalization; E-mail: ga\_kostin@spbguga.ru
- Viktor V. Kurlov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Integrated Quality Systems; E-mail: vitek543@rambler.ru
- Nikolay E. Baranov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University for Civil Aviation, Department of Aerodynamics and Flight Dynamic; Head of the Department; E-mail: nbaranov@yandex.ru

Received 13.12.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 19.06.2024.