

ISSN: 2220-9506 (Print)  
ISSN: 2414-0473 (Online)

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS  
OF MEASUREMENTS

Том 8

№ 4

Vol. 8

2017

# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

Журнал включен в базу данных Web of Science Core Collection (ESCI)

---

**Том 8**

**№ 4**

**2017**

---

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*Гусев О.К., д.т.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

*Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

## СЕКРЕТАРЬ

*Воробей Р.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Алексеев В.А., д.т.н., профессор, ученый секретарь Ижевского государственного технического университета (г. Ижевск, Россия)*

*Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)*

*Белоус А.И., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)*

*Бубулис А., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра мехатроники Каунасского технологического университета (г. Каунас, Литва)*

*Вайн А.А., д.т.н., профессор Тартуского университета (г. Тарту, Эстония)*

*Виба Я., д.т.н., профессор, директор Института механики Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)*

*Гуттен М., д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и прикладной электротехники Жилинского университета (г. Жилина, Словакия)*

*Джилавдари И.З., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

*Дмитриев С.М., д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия)*

*Достанко А.П., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)*

*Дэнилак С., профессор Производственно-исследовательского центра Технологического института штата Джорджия (г. Атланта, США)*

*Жагора Н.А., д.т.н., доцент, главный специалист по метрологии и стандартизации Белорусского государственного института метрологии (г. Минск, Беларусь)*

*Жарин А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

*Жуковский П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических устройств и техники высоких напряжений Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)*

*Загашвили Ю.В., д.т.н., профессор, член Наблюдательного и Сертификационного совета Ассоциации по сертификации «Русский регистр» (г. Санкт-Петербург, Россия)*

*Киселев М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)*

---

- Колтунович Т.Н.**, к.т.н., доцент, доцент Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)  
**Комаров Ф.Ф.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)  
**Кулешов Н.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)  
**Кучинский П.В.**, д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)  
**Кэмп А.**, профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)  
**Матеос Х.**, к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)  
**Машко В.В.**, д.ф.-м.н., заместитель директора Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)  
**Муравьев В.В.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)  
**Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)  
**Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, советник Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)  
**Погребняк А.Д.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)  
**Серенков П.С.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)  
**Соломахо В.Л.**, д.т.н., профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)  
**Турцевич А.С.**, д.т.н., начальник управления Министерства промышленности Республики Беларусь (г. Минск, Беларусь)  
**Хатько В.В.**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)  
**Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)  
**Чернявский А.Ф.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)  
**Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)  
**Шкадаревич А.П.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)  
**Юмашев К.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 25 июня 2010 г.  
Регистрационный номер 1372

В соответствии с решением ВАК от 8 июля 2011 г. №13/1 журнал включен в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований; научное направление: «Средства и методы измерений, контроля, диагностики и оценки качества объектов и процессов» (технические и физико-математические науки)  
ISSN 2220-9506

Журнал включен в базы данных: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».  
Подписные индексы – 74835; 748352.

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Макет и верстка: Жаборовская Л.В., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 05.12.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 300 экз.

Дата выхода в свет .12.2017. Заказ №

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛИ № 02330/74 от 03.03.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск

#### АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь,  
тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94  
e-mail: pimi@bntu.by  
<http://pimi.bntu.by>

# DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder  
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

The Journal is included in Web of Science Core Collection (ESCI)

---

**Volume 8**

**№ 4**

**2017**

---

**Editor-in-chief**

**Oleg K. Gusev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Deputy editor-in-chief**

**Aliaksandr M. Malyarevich**, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Secretary**

**Roman I. Varabei**, *PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Editorial board**

**Vladimir A. Alekseev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)*

**Victor M. Anishchik**, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Dean of the Physics Faculty, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

**Anatoly I. Belous**, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)*

**Algimantas Bubulis**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania)*

**Arvid A. Vain**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)*

**Janis Viba**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of Institute of Mechanics, Riga Technical University (Riga, Latvia)*

**Miroslav Gutten**, *Doctor of Science (Engineering), Head of Department of Metrology and Applied Electrical Engineering, University of Žilina (Žilina, Slovakia)*

**Igor Z. Gilavdary**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Sergei M. Dmitriev**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Rector of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)*

**Anatoly P. Dostanko**, *Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Electronic Technology and Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)*

**Steven Danyluk**, *PhD, Professor, Production and Research Center, Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)*

**Nikalai A. Zhagora**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head Specialist of Metrology and Standardization, Belarusian State Institute of Metrology (Minsk, Belarus)*

**Anatoly L. Zharin**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

**Pawel Zhukowski**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Apparatus and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

**Yuri V. Zagashvili**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, the Member of the Supervisory and Certification Board of Association for the Certification «Russian Register» (St. Petersburg, Russia)*

---

**Mikhail G. Kiselev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Manufacture of Devices Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Tomasz N. Koltunowicz**, PhD, Associate Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

**Fadey F. Komarov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

**Nikolay V. Kuleshov**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Petr V. Kuchynski**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

**Alan Kemp**, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)

**Xavier Mateos**, PhD, Associate Professor, Universitat Rovira i Virgili (Tarragona, Spain)

**Vasili V. Mashko**, Doctor of Science (Engineering), Deputy Director of B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

**Valentin V. Murav'iov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Telecommunication Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

**Vladimir A. Pilipenko**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis», Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)

**Yuriy M. Pleskachevsky**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, the Adviser of National Academy of Sciences of Belarus, (Minsk, Belarus)

**Alexander D. Pogrebnyak**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

**Pavel S. Serenkov**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Standardization, Metrology and Information Systems Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Vladimir L. Solomakho**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of the Republican Institute of Innovative Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Arkady S. Turtsevich**, Doctor of Science (Engineering), Chief of Department, the Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)

**Viacheslav V. Khatko**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Tse Li**, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)

**Alexander F. Cherniavsky**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Intelligent Systems Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

**Sergei A. Chizhik**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

**Alexey P. Shkadarevich**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO (Minsk, Belarus)

**Konstantin V. Yumashev**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**The Journal is included in the following databases: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet**

**ADDRESS:**

Belarusian National Technical University  
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus  
Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94  
e-mail: pimi@bntu.by  
<http://pimi.bntu.by>

## СОДЕРЖАНИЕ

### Средства измерений

<i>Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Андрухович И.М., Застенкер Г.Н., Бородкова Н.Л., Костенко В.И., Каримов Б.Т.</i> <b>Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея .....</b>	<b>305</b>
<i>Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П., Сяктерев В.Н., Волков В.В.</i> <b>Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред.....</b>	<b>314</b>
<i>Самбрано Л.Ф., Артюхина Н.К., Пероса Л.В.</i> <b>Расчет светозащитной бленды двухзеркального зафокального объектива.....</b>	<b>327</b>
<i>Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.</i> <b>Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне.....</b>	<b>334</b>

### Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Филипня В.А., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л.</i> <b>Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электротометрии.....</b>	<b>344</b>
<i>Сабитов А.Ф., Сафина И.А.</i> <b>Методика определения характеристической кривой тепловой инерции авиационных датчиков температуры газов.....</b>	<b>357</b>
<i>Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.</i> <b>Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности.....</b>	<b>365</b>
<i>Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.</i> <b>Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта.....</b>	<b>374</b>
<i>Пантелеев К.В., Кравцевич А.В., Ровба И.А., Лысенко В.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л.</i> <b>Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина.....</b>	<b>386</b>

### Методы оценки качества объектов и процессов

<i>Должанский А.М., Бондаренко О.А., Петлёваный Е.А.</i> <b>Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта.....</b>	<b>398</b>
--	------------

---

## CONTENTS

### Measuring Instruments

- Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M., Zastenker G.N., Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T.*  
**The design of the solar wind ion flux sensors based on the Faraday cup..... 305**
- Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P., Syakterev V.N., Volkov V.V.*  
**Technique and device for the experimental estimation of the acoustic impedance of viscoelastic media..... 314**
- Zambrano L.F., Artyukhina N.K., Peroza L.V.*  
**Calculation of a glare stop for two-mirror extra-focal objective..... 327**
- Buday A., Grinchuk A., Gromyko A.*  
**Practical implementation of hardware and software complex for planar measurements of antenna characteristics in the near zone..... 334**

### Methods of measurements, monitoring, diagnostics

- Pilipenko V.A., Saladukha V.A., Filipenya V.A., Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L., Pantsialeyeu K.V., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.*  
**Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods ..... 344**
- Sabitov A.F., Safina I.A.*  
**Method for determination of the characteristic curve of the thermal inertia of aircraft gas temperature sensors..... 357**
- Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.*  
**Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface ..... 365**
- Kozhevnikov D.A., Feodortsau R.V.*  
**The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object ..... 374**
- Pantsialeyeu K.U., Krautsevich A.U., Rovba I.A., Lysenko V.I., Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L.*  
**Analysis of the electrophysical and photoelectric properties of nanocomposite polymers by the modified Kelvin probe ..... 386**

### Methods of quality estimation of products and processes

- Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Petyovaniy Ye.A.*  
**Influence of the average weighted estimation type on the dependence of the complex quality index on the object parameters..... 398**
-

УДК 621.357.6

## Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея

Мухуров Н.И.<sup>1</sup>, Гасенкова И.В.<sup>1</sup>, Андрухович И.М.<sup>1</sup>, Застенкер Г.Н.<sup>2</sup>, Бородкова Н.Л.<sup>2</sup>, Костенко В.И.<sup>2</sup>, Каримов Б.Т.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>2</sup>Институт космических исследований Российской академии наук,  
ул. Профсоюзная, 84/32, г. Москва 117997, Россия

<sup>3</sup>СКБ космического приборостроения Института космических исследований Российской академии наук,  
ул. М. Горького, 33, г. Таруса 249101, Калужская область, Россия

Поступила 07.07.2017

Принята к печати 08.09.2017

Важными задачами современных космических исследований являются изучение и непрерывные наблюдения процессов космической и метеорологической «погоды». Одним из электронных приборов для проведения таких исследований является датчик плазмы на основе цилиндра Фарадея. Цель работы состояла в разработке конструктивного варианта цилиндра Фарадея с прецизионными чувствительными (селектирующими) элементами в виде металлических сеточных микроструктур и четырехсекторным коллектором, не имеющего аналогов в мировой технике.

Для формирования сеточных никелевых микроструктур разработан процесс создания с помощью фотолитографии матрицы из нанопористого анодного оксида алюминия как прецизионной формы (шаблона) для осаждения наноструктурированных металлических слоев. Разработаны методы проведения тестовых испытаний на механические (вибрационные) и термоциклические воздействия, соответствующие требованиям к космическим приборам.

Сеточные микроструктуры сформированы в едином технологическом цикле с кольцами-держателями по периметру сетки, с квадратным  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup> сечением полотна и ячейками размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Прозрачность каждой из сеток при нормальном падении света составила более 90 %. Габаритные размеры держателей и сеточных микроструктур: внутренние диаметры (34, 47, 60) ± 0,1 мм, внешние диаметры колец (42, 55, 68) ± 0,1 мм соответственно. Масса одной сетки составила менее 50 мг.

Результаты испытаний продемонстрировали работоспособность разработанных сеточных микроструктур при многократных термоциклических воздействиях от –50 до +150 °С и вибрационных и статических перегрузках, характерных при космических полетах. В составе приборов для проведения плазменных измерений в окрестности Земли и в межпланетном пространстве будут использованы шесть датчиков с различной угловой ориентацией. Это обеспечит возможность фиксирования ионов космической плазмы в телесном угле около 180°.

**Ключевые слова:** датчик потоков космической плазмы, цилиндр Фарадея, прецизионные чувствительные (селектирующие) элементы, четырехсекторный коллектор, широкоугольный прибор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

**Адрес для переписки:**

Мухуров Н.И.  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

**Address for correspondence:**

Mukhurov N.I.  
SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

**Для цитирования:**

Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Андрухович И.М., Застенкер Г.Н.,  
Бородкова Н.Л., Костенко В.И., Каримов Б.Т.

Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе  
цилиндра Фарадея.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 305–313.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

**For citation:**

Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M., Zastenker G.N.,  
Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T.

[The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based  
on the Faraday Cup].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 305–313 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

# The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based on the Faraday Cup

Mukhurov N.I.<sup>1</sup>, Gasenkova I.V.<sup>1</sup>, Andruhovich I.M.<sup>1</sup>, Zastenker G.N.<sup>2</sup>, Borodkova N.L.<sup>2</sup>, Kostenko V.I.<sup>2</sup>, Karimov B.T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Scientific and Production Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus

<sup>2</sup>Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow 117997, Russia

<sup>3</sup>Special Design Bureau for Space Instruments Engineering of the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Gorky str., 33, Tarusa 249101, Kaluga region, Russia

Received 07.07.2017

Accepted for publication 08.09.2017

## Abstract

Important tasks of modern space research are the study and continuous observations of the processes of cosmic and meteorological «weather». One of the electronic devices for carrying out such researches is a plasma sensor based on Faraday cup. The purpose of the work was to develop a constructive variant of the Faraday cup with precision sensitive (selective) elements in the form of metal grid microstructures and a four-sector collector, which has no analogues in the world technology.

For the formation of grid nickel microstructures, a process has been developed for creating a matrix of nanoporous anodic aluminum oxide by photolithography as a precision shape (template) for depositing nanostructured metal layers. Methods for conducting testing for mechanical (vibrational) and thermocyclic impact that satisfies the requirements for space instruments have been developed.

The grid microstructures are formed in a unified technological cycle with the production of ring-holders along the perimeter of the grid, with a square  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  section of the web and square cells with a size of  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ . The transparency of each of the grids was more than 90 % for the normal incidence of light. Dimensions of holders and grid microstructures: internal diameters (34, 47, 60)  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , external diameters of rings (42, 55, 68)  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , respectively. The weight of one grid was less than 50 mg.

The test results demonstrated the operability of the developed grid microstructures with multiple thermocyclic actions from  $-50$  to  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$  and vibrational and static overloads specific for space flights. Instruments for plasma measurements in the near of the Earth and in the interplanetary space will comprise six sensors with different angular orientations. This will make it possible to detect ions of cosmic plasma in a solid angle of about  $180^\circ$ .

**Keywords:** solar wind ion flux sensor, Faraday cup, precisions sensitive (selective) elements, four-sector collector, wide-angle device.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

---

### Адрес для переписки:

Мухуров Н.И.  
ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

### Address for correspondence:

Mukhurov N.I.  
SSPA «Optics, Optoelectronics and Laser Technology»,  
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

---

### Для цитирования:

Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Андрухович И.М., Застенкер Г.Н.,  
Бородкова Н.Л., Костенко В.И., Каримов Б.Т.

Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 305–313.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

### For citation:

Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M., Zastenker G.N.,  
Borodkova N.L., Kostenko V.I., Karimov B.T.

[The Design of the Solar Wind Ion Flux Sensors Based on the Faraday Cup].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 305–313 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-305-313

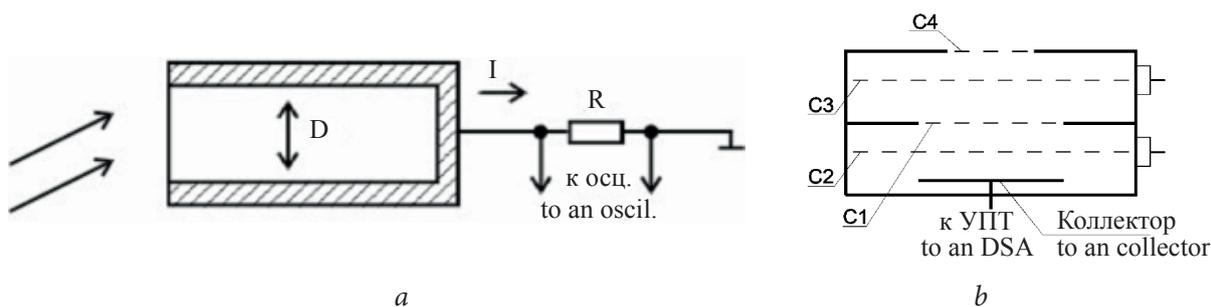
## Введение

Одной из проблем, возникающих при предсказании космической погоды, является существование непредсказуемых вариаций параметров (турбулентности) в солнечном ветре, магнитослое (области между околоземной ударной волной и границей магнитосферы – магнитопаузой) и в самой магнитосфере. Характеристики турбулентности в данных областях, особенно в высокочастотном диапазоне, несмотря на длительный период космических исследований у нас в стране и за рубежом, сравнительно мало исследованы, что было связано с определенными принципиальными трудностями (на одном космическом аппарате трудно различить пространственные и временные вариации) [1, 2]. Наблюдаемые значительные и быстрые вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля приводят к изменению состояния магнитосферы Земли, что влияет (иногда катастрофически) на жизнедеятельность человека, техносферную сферу [3–5]. Плотность плазмы солнечного ветра является одним из ключевых параметров для прогнозирования космической погоды. Существуют два метода определения плотности солнечного ветра: с использованием спектрометра и микроканальных пластин и ловушки, конструируемые на основе цилиндра Фарадея. К достоинствам первого метода относится хорошее измерение скорости и температуры плазмы солнечного ветра, но прямое измерение потока частиц в космической плазме представляет собой значительную

проблему. Только один апробированный в космических экспериментах тип датчика, который с некоторыми ограничениями может быть отнесен к измерителям потока частиц, – цилиндр Фарадея – позволяет определять концентрацию и скорость солнечного ветра с высокой точностью [5–7]. Это устройство может быть использовано для измерения параметров малоэнергетичной плазмы, имеющейся в солнечном ветре и переходной области, влияния солнечной активности на процессы в магнитосферно-ионосферной системе, механизмов, посредством которых это влияние осуществляется.

## Особенности функционирования датчика на основе цилиндра Фарадея применительно к измерениям потоков космической плазмы

Конструкция датчика на основе цилиндра Фарадея и принцип его работы (рисунок 1а) известны [8]. Это устройство для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц названо в честь английского физика М. Фарадея. Представляет собой металлический стакан с открытым входным окном, содержащий металлический коллектор для регистрации электрического тока, возникающего в измерительном контуре при движении заряженных частиц, входящих через окно. Цилиндры Фарадея используют для измерения распределения плотности электронного пучка, измерения поляризации, электрического потенциала и т. д. [5–8].



**Рисунок 1** — Упрощенное схематическое изображение конструкции цилиндра Фарадея и обобщенной схемы регистрации потока ионов (а) и принципиальная схема датчика потока космической плазмы на основе цилиндра Фарадея (b)

**Figure 1** — A simplified schematic representation of the design of the Faraday cylinder and the general scheme for recording the ion flux (a) and a schematic diagram of space plasma flow sensor based on the Faraday cylinder (b)

Применительно к экспериментальным исследованиям потока космической плазмы в качестве датчиков используются цилиндры Фарадея с элементами регистрации отдельных частиц

[9, 10]. Для разделения заряженных частиц по знаку заряда и по величине их энергии предусмотрен набор диафрагм, формирующих угловую диаграмму датчика, и набор сеток (рисунок 1b).

Эти селектирующие элементы являются существенной составляющей датчиков [11].

Цилиндр Фарадея состоит из корпуса, имеющего входное окно, сеток С1–С4 и коллектора. Принцип работы датчика заключается в следующем: при попадании на коллектор ионов плазмы в цепи коллектора возникает ток, который усиливается присоединенным к коллектору усилителем постоянного тока (УПТ) и затем преобразуется в выходное электрическое напряжение. Сетка С2 (супрессорная) предназначена для отсечки электронов солнечного ветра и возвращения на коллектор фотоэлектронов и вторичных электронов, выбиваемых из коллектора фотонами УФ-излучения Солнца и ударами ионов солнечного ветра. На сетку С2 подается отрицательное относительно корпуса напряжение порядка 300 В. Сетки С1, С4 (земляные) соединены с корпусом датчика. Сетка С3 (управляющая) служит для селекции потока ионов по величине их энергии, для чего на эту сетку подается фиксированное или переменное тормозящее ионы положительное относительно корпуса напряжение в пределах от нескольких десятков вольт до нескольких киловольт.

К преимуществам цилиндра Фарадея относятся его простота, высокая степень надежности, долгий срок службы (связанные с отсутствием полупроводниковых детекторов), возможности измерения полного, т. е. интегрального по энергии и по массам потока частиц, регистрации потоков частиц в довольно широком угловом окне и достижения высокого временного разрешения. Эти преимущества обеспечили широкое применение приборов с цилиндрами Фарадея в качестве датчиков во множестве экспериментов

по изучению межпланетной плазмы и плазмы в магнитосфере Земли и магнитосферах других планет. Они применялись на ряде американских космических аппаратов *WIND* и *Voyager-1, 2*. Одним из лучших по функциональным возможностям можно считать прибор *IAP* на французском спутнике *Demeter*. В области космических исследований с помощью цилиндров Фарадея осуществлялись измерения потоков частиц в рамках таких проектов, как «Прогноз-8», «Прогноз-10», «Прогноз-11», «Интербол», «Спектр-Р» и др.

Один прибор быстрого мониторинга солнечного ветра включает в себя несколько датчиков (цилиндров Фарадея), которые по назначению и конструкции делятся на две группы (рисунок 2). Один или несколько датчиков первой группы направлены в одну сторону и предназначены для измерения энергетических спектров потока ионов в диапазоне 0,25–3,0 кэВ/заряд. Для этого на управляющие сетки этих датчиков подается положительное относительно корпуса электрическое напряжение от 0,1 до 3,0 кВ. Изменение управляющего напряжения позволяет определять распределение по величине энергии на заряд, из которого, в свою очередь, вычисляются основные параметры потока ионов: переносная скорость, ионная температура и концентрация. Три датчика второй группы направлены в разные стороны и предназначены для определения величины и направления полного (т. е. интегрального по энергии) вектора потока ионов солнечного ветра (или магнитослоя). На них запирающее напряжение не подается. Для этого оси датчиков отклонены от главной оси прибора на 20° и друг от друга на 120°. Ширина и форма полной угловой



a



b

**Рисунок 2** – Прибор быстрого мониторинга солнечного ветра: *a* – основной блок с цилиндрами Фарадея; *b* – датчик ДП-5М

**Figure 2** – Device for rapid monitoring of solar wind: *a* – basic block with Faraday cups; *b* – sensor DP-5M

характеристики подбираются таким образом, что в пределах  $\pm 20^\circ$  от оси датчика суммарный ток трех коллекторов почти не зависит от угла прихода частиц. Электрический ток каждого коллектора при тех же отклонениях существенно зависит от направления приходящих ионов, что позволяет определять углы прихода ионов по соотношению измеренных токов каждым цилиндром Фарадея. Все датчики снабжаются супрессорными сетками, на них подается отрицательное относительно корпуса напряжение порядка 500 В, запирающее поток электронов солнечного ветра и возвращающее на коллектор вторичные электроны, выбитые из коллектора УФ-излучением Солнца или ионами потока солнечного ветра.

Сетки и коллектор изолированы друг от друга и от корпуса прокладками и стойками из фторопласта и капролона. Рабочая поверхность коллектора имеет специальную технологическую обработку для уменьшения коэффициента отражения в ультрафиолетовой области солнечного спектра до величины  $\leq 2\%$ . Поверхности корпуса датчика и диафрагмы имеют гальваническое покрытие Хс (хром черный) с коэффициентом отражения в ультрафиолетовой области  $\leq 6\%$ . Все сетки – электроды изготовлены из проволоки диаметром 0,015 мм, закрепленной на изолирующих кольцах. Материал проволоки – сплав ВК–20 (вольфрам-кобальт). Ячейка сетки квадратная размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>, покрытие сеток гальваническое Хс (хром черный).

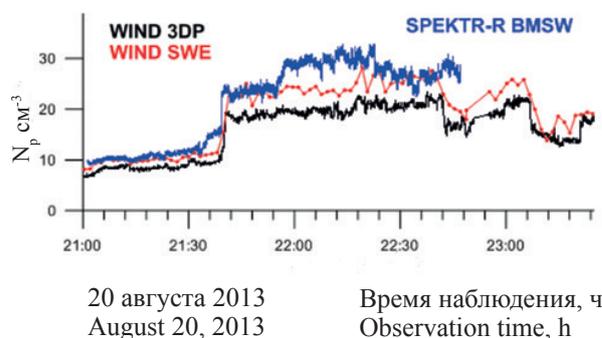
На рисунке 3 приведен пример измерения концентрации ионов солнечного ветра для одного и того же события электростатическим анализатором и цилиндрами Фарадея [3]. Видно, что концентрация, измеренная цилиндрами Фарадея на разных спутниках, совпадает по величине и больше, чем концентрация, измеренная спектрометром.

Результаты измерений позволяют судить о физических процессах, происходящих в космическом пространстве.

### Конструктивное исполнение экспериментальных датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея

Современный технический уровень в области создания датчиков потоков космической плазмы характеризуется следующими показателями: чувствительность  $\approx 3 \cdot 10^5$  част.  $\cdot$  см<sup>-2</sup>  $\cdot$  с<sup>-1</sup>; масса  $\approx 200$  г;

габариты: высота  $\approx 40$  мм, диаметр  $\approx 80$ –100 мм, угол зрения  $\approx \pm 60^\circ$ ; максимальное значение электрического напряжения на селектирующей сетке  $\approx 3$  кВ; прозрачность набора сеток  $\approx 60\%$ .



**Рисунок 3** – Концентрация ионов солнечного ветра по данным приборов 3DP (анализатор), SWE (цилиндр Фарадея) и BMSW (цилиндр Фарадея)

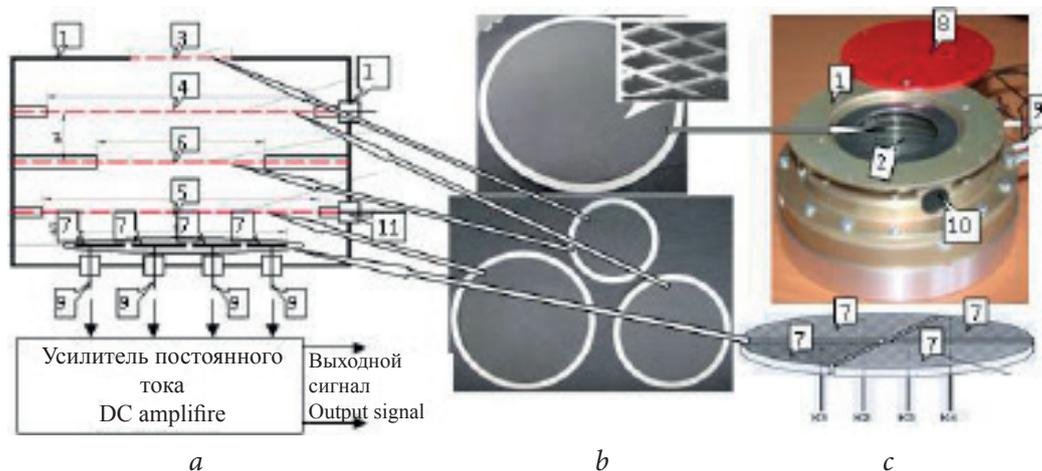
**Figure 3** – The concentration of solar wind ions according to 3DP (analyzer), SWE (Faraday's cylinder) and BMSW (Faraday's cylinder)

Основные тенденции развития направлены на снижение массы и размеров, повышение чувствительности, расширение энергетического диапазона измерений, уменьшение потерь тока коллектора вследствие токов фотоэлектронов и вторичных электронов, увеличение срока службы.

Конструкция экспериментального образца датчика потока космической плазмы представлена на рисунке 4. Особенность конструкции разработанного экспериментального образца датчика потока плазмы заключается в использовании составного коллектора, разделенного на четыре сектора, каждый из которых имеет свой отдельный вывод.

Это позволяет существенно улучшить алгоритм быстрого определения параметров потока плазмы и минимизировать массу прибора, в который будет встраиваться датчик потока плазмы. Увеличенный диапазон значений высокого электрического напряжения до 4–5 кВ, подаваемого на управляющую сетку, позволяет получать сведения о составе потока солнечного ветра, хотя датчик потока космической плазмы не содержит устройств для селекции ионов по массе.

При попадании на коллектор потока ионов солнечного ветра в цепи коллектора возникает электрический ток, который усиливается присоединенным к коллектору усилителем постоянного тока и затем преобразуется в выходное электрическое напряжение. Электрическое соединение



**Рисунок 4** – Схематическое изображение конструкции экспериментального образца (а), фотографии чувствительных элементов (сеточных структур) (b) и фотография датчика потока ионов космической плазмы и 4-секционного коллектора (с): 1 – корпус; 2 – входное окно; 3 – внешняя диафрагма; 4 – супрессорный элемент; 5 – управляющий элемент; 6 – внутренняя диафрагма; 7 – четыре секции коллекторов; 8 – технологическая пылевлагозащитная крышка; 9 – контакты коллекторов в виде штырей; 10 – гнездо для подключения высокого напряжения; 11 – изоляторы

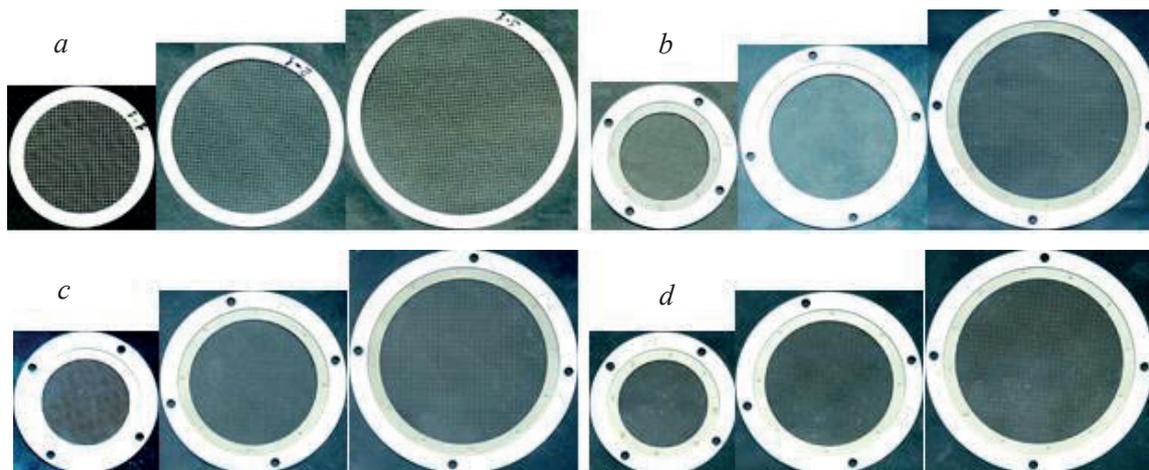
**Figure 4** – Schematic representation of the design of the experimental sample (a), photographs of the sensing elements (grid structures) (b) and a photograph of the ion flux sensor of the cosmic plasma and the 4-sectional collector (c): 1 – case; 2 – entrance window; 3 – external diaphragm; 4 – suppressor element; 5 – control element; 6 – internal diaphragm; 7 – four sections of collectors; 8 – technological dust and moisture protection cover; 9 – contacts of collectors in the form of pins; 10 – a socket for connection of a high voltage; 11 – insulators

датчика с цепями электроники осуществляется штыревыми контактами 9 коллекторов и высоковольтными вводами 10 к селекционирующим элементам. Набор электродов состоит из четырех элементов, в том числе двух диафрагм, имеющих электрическое соединение с корпусом. На супрессорные 4 и управляющие 5 элементы от источников электропитания подаются соответствующие относительно корпуса величины напряжения: супрессорное (–500 В) – для подавления тока вторичных электронов и фотоэлектронов с коллектора и отсечки потока электронов солнечного ветра; управляющее (от 0 до +4000 В) – для селекции ионов солнечного ветра по величине энергии. Супрессорные и управляющие элементы и коллектор 7 изолированы друг от друга и от корпуса прокладками-стойками 11 из фторопласта и капролона.

Комплект диафрагм, селекционирующих элементов и держателей для датчиков потока космической плазмы включает сетки и держатели разных модификаций и типоразмеров в соответствии с различными типами датчиков потока плазмы. Элементы представляют собой сеточные микроstructures с квадратными ячейками размером до  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Линейные составляющие микроstructures имеют квадратное сечение  $20 \times 20$  мкм<sup>2</sup>.

Сеточные микроstructures прикрепляются по периметру к кольцам-держателям из аналогичных сетке материала и толщины. Габаритные размеры держателей и сеточных микроstructures составляют: внутренние диаметры  $(34, 47, 60) \pm 0,1$  мм, внешние диаметры колец  $(42, 55, 68) \pm 0,1$  мм соответственно. Материал сеток и колец – никель. Прозрачность каждой из сеток при нормальном падении света составила более 90 %. Минимальная масса одной сетки не превосходила 50 мг. Показано, что внешние размеры деталей могут варьироваться от 30 до 100 мм при общей толщине от 10 до 20 мкм, при этом микронные размеры сеточной структуры (сечение – 10–20 мкм<sup>2</sup>, расстояние между ячейками – 1000 мкм) сочетаются с миллиметровыми размерами ширины внешнего крепежного кольца (5–8 мм).

Определение способности конструкции и технологии изготовления экспериментальных образцов селекционирующих элементов противостоять типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета, выполнено с помощью лабораторных испытаний. Для этого была разработана программа и методики предварительных комплексных испытаний чувствительных элементов.



**Рисунок 5** – Чувствительные элементы различных диаметров в исходном состоянии (а), после микросварки оправы (b), механических (c) и термоциклических (d) воздействий

**Figure 5** – Sensitive elements of different diameters in the initial state (a), after micro-welding of the frame (b), mechanical (c) and thermocyclic (d) influences

### Стойкость экспериментальных образцов селективирующих элементов к термомеханическим воздействиям

Предварительные комплексные испытания экспериментальных образцов сеточных чувствительных элементов проводились при нормальных климатических условиях: температура  $25 \pm 10$  °С; относительная влажность воздуха не более 80 %; атмосферное давление от 84,0 до 106,7 кПа (630–800 мм рт. ст.). Термоциклирование выполнялось в климатической камере и термокамере. При проведении испытаний на термоциклирование были созданы следующие условия: минимальная температура окружающей среды  $-50 \pm 2$  °С, максимальная температура окружающей среды  $+150 \pm 2$  °С, атмосферное давление от  $1,3 \times 10^{-7}$  до 106,7 кПа ( $10^{-6}$  – 800 мм рт. ст.). Применяемые для испытаний и обработки стандартные средства измерений зарегистрированы в Госреестре и поверены метрологической службой в соответствии с ПР 50.2.006-94. Измерительные средства и приборы, не подлежащие поверке, имели технические паспорта или сертификаты, подтверждающие их исправность.

Критерием работоспособности чувствительных элементов – сеточных микроструктур является целостность их структуры. Целостность структуры сеток проверялась с помощью визуального контроля под микроскопом с 10-кратным увеличением.

Конструкции чувствительных элементов выдержали испытания проверкой на пробой.

Чувствительные элементы обеспечивали нормальное функционирование при приложении к ним (как в вакууме, так и на воздухе) постоянного положительного относительно корпуса электрического напряжения величиной до 4,0 кВ и отрицательного постоянного относительно корпуса напряжения величиной до 500 В. Испытательное электрическое напряжение прикладывалось между выводом чувствительного элемента при его установке на проводящем основании. Чувствительные элементы нормально функционировали при температуре от  $-50$  до  $+150$  °С и сохраняли свою работоспособность после воздействия механических нагрузок (вибрационных перегрузок, статических перегрузок от линейных ускорений и импульсных перегрузок). Статические перегрузки (действовали совместно 15 мин):  $n_x = \pm 4,0$  g;  $n_y = \pm 0,5$  g;  $n_z = \pm 0,5$  g. Испытания проводили на частоте для первого диапазона 15 Гц, для второго – 6 Гц.

Анализ качества разработанных чувствительных элементов после предварительных комплексных испытаний подтвердил неизменность геометрических параметров (рисунок 5).

Отдельные ячейки с незначительным отклонением от контролируемых параметров при общем количестве ячеек в несколько сотен практически не смогут оказывать сколь заметного влияния на характеристики датчиков плазмы.

### Заключение

Разработанные датчики потока космической плазмы с сеточными чувствительными

элементами удовлетворяют основным техническим требованиям к ним (величины прозрачности, однородности и целостности структуры, отклонения от плоскостности, надежности крепления контактов, теплового режима работы, стойкости к вибрационным и ударным воздействиям и т. д.) и, как следствие, могут быть использованы в качестве таких элементов в составе нового поколения датчиков потоков космической плазмы для проведения реальных космических экспериментов [12].

Создание нового поколения датчиков потоков космической плазмы позволит заменить собой несколько одноколлекторных цилиндров Фарадея, что приведет к существенному уменьшению массы и объема плазменного спектрометра при выполнении всех необходимых задач. Наличие нескольких коллекторов и параллельных измерительных цепей обеспечит резервирование, возможность гибкого алгоритма работы и тем самым существенно повысит надежность прибора.

Разработанный экспериментальный образец датчика потока космической плазмы на основе чувствительных (селектирующих) элементов из наноструктурированных материалов, с одной стороны, соответствует выявленным тенденциям, с другой – представляет собой новое устройство, не имеющее аналогов в мировой технике, в связи с выполнением его коллектора разделенным на несколько частей, а также применением в его конструкции абсолютно новых наноструктурированных материалов и увеличением диапазона значений электрического напряжения, подаваемого на управляющую сетку.

## Список использованных источников

1. Фундаментальные космические исследования: в 2 кн. Кн. 2. Солнечная система / под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2014. – 456 с.
2. Basics of the Solar Wind (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). – Cambridge University Press, 2007. – 478 p.
3. Kasper, J.C. Solar wind ion and electron distribution functions and the transition from fluid to kinetic behavior / J.C. Kasper. – Harvard-Smithsonian center for astrophysics. GYPW01, Isaac Newton Institute, 2010. – 46 p.
4. Shopov, Y. Cycles of the Solar Wind Flux at the Front of the Earth's Magnetosphere / Y. Shopov, D. Stoykova // AIP Conf. Proc. – 2011. – Vol. 1356. – P. 192. doi: 10.1063/1.3598105
5. Застенкер, Г.Н. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра /

Г.Н. Застенкер [и др.] // Космические исследования. – 2015. – Т. 53, № 1. – С. 63–74.

6. Tariq, H.A.R. Variation of ion energy flux with increasing working gas pressures using Faraday cup in plasma focus device / H.A.R. Tariq, I.A. Khan, U. Ikhtlaq, A. Hussnain // Journal of Natural Sciences and Mathematics. – 2008. – Vol. 48, no. 1 & 2. – P. 65–72.

7. Vaverka, J. Calibration of Faraday Cups used on the Spectr-R Spacecraft for Monitoring the Solar Wind / J. Vaverka [et al.] // WDS'11 Proceedings of Contributed Papers. – Part II. – 2011. – P. 34–39.

8. Brown, K.L. Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams / K.L. Brown, G.W. Tautfest // Review of Scientific Instruments. – 1956. – Vol. 27 (9). – P. 696–702. doi: 10.1063/1.1715674

9. Смолук, В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / В.В. Смолук; под ред. чл.-корр. РАН Н.С. Диканского. – Новосибирск: Параллель, 2009. – 294 с.

10. Faraday cup for detecting plasma immersion-injection dose. Patent CN101615578 China, H01L21/265. Institute of microelectronics of Chinese academy of sciences. Patent Application no. CN20091304720. Priority date 23.07.2009. Date of publication 30.12.2009.

11. Мухуров, Н.И. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы / Н.И. Мухуров, И.В. Гасенкова, И.М. Андрухович // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 1. – С. 48–56.

12. Сайт Совета РАН по космосу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stp.cosmos.ru>. – Дата доступа: 05.06.2017.

## References

1. Fundamental'nye kosmicheskie issledovaniya [Fundamental cosmic research]. In 2 books. Book 2. Solnechnaya sistema [Solar system]. Under the scientific editorship of Dr. Sc., Prof. G.G. Raikunov. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014, 456 p. ISBN 978-5-9221-1559-9 (in Russian).
2. Basics of the Solar Wind (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge University Press, 2007, 478 p.
3. Kasper J.C. Solar wind ion and electron distribution functions and the transition from fluid to kinetic behavior. Harvard-Smithsonian center for astrophysics. GYPW01, Isaac Newton Institute, 2010, 46 p.
4. Shopov Y., Stoykova D. Cycles of the Solar Wind Flux at the Front of the Earth's Magnetosphere. AIP Conf. Proc., 2011, vol. 1356, p. 192. doi: 10.1063/1.3598105
5. Zastenker G.N., Khrapchenkov V.V., Koloskova I.V., Gavrilova E.A., Ryazanova E.E., Ryazanseva M.O., Gagua T.I., Gagua I.T., Shafrankova J., Nemechek Z., Prech L., Voita J. Rapid Variations of the Value and Direction of the Solar Wind Ion Flux. Cosmic Research, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 59–69.

6. Tariq H.A.R., Khan I.A., Ikhlaq U., Hussnain A. Variation of ion energy flux with increasing working gas pressures using Faraday cup in plasma focus device. *Journal of Natural Sciences and Mathematics*, 2008, vol. 48, no. 1 & 2, pp. 65–72.
7. Vaverka J., Němeček Z., Přeč L., Šafránková J., Komárek A. Calibration of Faraday Cups used on the Spectr-R Spacecraft for Monitoring the Solar Wind. *WDS'11 Proceedings of Contributed Papers*, part II, 2011, pp. 34–39. ISBN 978-80-7378-185-9
8. Brown K.L., Tautfest G.W. Faraday-Cup Monitors for High-Energy Electron Beams. *Review of Scientific Instruments*, 1956, vol. 27 (9), pp. 696–702.  
**doi:** 10.1063/1.1715674
9. Smalyuk V.V. *Diagnostika puchkov zaryazhennykh chastits v uskoritelyakh* [Diagnosis of charged particle beams in the accelerators] Under the scientific editorship of member corr. RAS N.S. Dikanskii, Novosibirsk, Pararel' Publ., 2009, 294 p (in Russian).
10. Faraday cup for detecting plasma immersion-injection dose. Patent CN101615578 China, H01L21/265. Institute of microelectronics of Chinese academy of sciences. Patent Application no. CN20091304720. Priority date 23.07.2009. Date of publication 30.12.2009.
11. Mukhurov N.I., Gasenkova I.V., Andruhovich I.M. Specific Features of Formation of Precision Sensitive Elements for the Space Plasma Sensors. *Journal of Nano and Microsystem Technique*, 2015, no. 1, pp. 54–56.
12. *Sait Soveta RAN po kosmosu* [Website of RAS Council on Space]. Available at: <http://stp.cosmos.ru>. (accessed 05.06.2017).

УДК 534.641

## Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П., Сяктерев В.Н., Волков В.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 17.10.2017

Принята к печати 30.11.2017

Измерение характеристик технологических жидкостей позволяет оценить их качество, биологических тканей – дифференцировать здоровые ткани и ткани с патологиями. Одним из комплексных акустических параметров является импеданс, позволяющий наиболее полно оценивать характеристики вязкоупругих сред. Большинство методов измерения импеданса требуют использования двух и более эталонных сред и наличия калиброванных акустических преобразователей. Целью данной работы являлась разработка новой методики и установки для экспериментальной оценки продольного и сдвигового импедансов вязкоупругой среды, основанных на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, колеблющейся в исследуемой среде.

В работе описываются методика и устройство для экспериментальной оценки импедансов вязкоупругих сред. Предложенная методика позволяет измерить продольный и сдвиговый импедансы и определить скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн и значений упругих модулей вязкоупругих сред, в том числе в различных агрегатных состояниях. Методика достаточно проста в реализации и может быть воспроизведена с помощью несложного лабораторного оборудования.

Полученные значения акустических импедансов исследованных сред удовлетворительно согласуются с их справочными данными. В отличие от известных методов определения акустического импеданса, разработанная методика позволяет с достаточной точностью оценивать трудно поддающееся измерению на частотах мегагерцового диапазона значение сдвигового импеданса вязкоупругих сред, определяющее модуль сдвига материала и характеризующее его сопротивление сдвиговым деформациям. Приведены результаты реализации разработанной методики для оценки акустических параметров на примере ряда сред с нулевой сдвиговой упругостью (спирт, ацетон) и вязкоупругих сред (глицерин, архитектурный пластилин, силиконовый герметик, клей МР-55 до и после полимеризации).

**Ключевые слова:** акустический импеданс, вязкоупругие среды, методика измерений, АЧХ, схема замещения пьезопластины.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

---

**Адрес для переписки:**

Богдан О.П.

Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

**Address for correspondence:**

Bogdan O.P.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

**Для цитирования:**

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П.,  
Сяктерев В.Н., Волков В.В.

Методика и устройство для экспериментальной оценки  
акустического импеданса вязкоупругих сред.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 314–326.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

---

**For citation:**

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P.,  
Syakterev V.N., Volkov V.V.

[Technique and device for the experimental estimation of the acoustic  
impedance of viscoelastic medium].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 314–326 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

# Technique and device for the experimental estimation of the acoustic impedance of viscoelastic medium

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P., Syakterev V.N., Volkov V.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 17.10.2017

Accepted for publication 30.11.2017

## Abstract

Measuring the characteristics of process fluids allows us to evaluate their quality, biological tissues – to differentiate healthy tissues and tissues with pathologies. Measuring the characteristics of process fluids allows us to evaluate their quality, biological tissues – to differentiate healthy tissues and tissues with pathologies. One of the complex acoustic parameters is the impedance, which allows one to fully evaluate the characteristics of viscoelastic media. Most of impedance methods of measurements require using two or more reference media and the availability of calibrated acoustic transducers. The aim of this work was to introduce a method and construction for the experimental evaluation of the longitudinal and shear impedance of viscoelastic media based on measuring the parameters of the amplitude-frequency characteristics and calculating the elements of the electric circuit for replacing the piezoelectric element which vibrates in the test medium.

The paper introduces a method and construction of the experimental evaluation of the impedances of viscoelastic media. The suggested method is allowed measuring longitudinal and shear impedances and determining velocities of longitudinal and transverse ultrasonic waves and the values of the elastic moduli of viscoelastic media, including in various aggregate states. The technique is fairly simple to implement and can be reproduced using simple laboratory equipment.

The obtained values of the acoustic impedances of the investigated media are in satisfactory agreement with their reference data. In contrast to the known methods for determining the acoustic impedance, the developed technique allows us to estimate with sufficient accuracy the parameter of the shear impedance of viscoelastic media that is difficult to measure at the frequencies of the megahertz range, which determines the shear modulus of the material and characterizes its resistance to shear deformations. The results of the implementation of the developed technique for the estimation of acoustic parameters for a number of media with zero shear elasticity (alcohol, acetone) and viscoelastic media (glycerin, architectural clay, silicone sealant and glue MP-55 before and after polymerization) are presented.

**Keywords:** acoustic impedance, viscoelastic media, methods of measurements, amplitude frequency response, equivalent circuit piezoelectric plate.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

---

### Адрес для переписки:

Богдан О.П.  
Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова,  
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

### Address for correspondence:

Bogdan O.P.  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Udmurt Republic, Russia  
e-mail: pmkk@istu.ru

---

### Для цитирования:

Муравьева О.В., Муравьев В.В., Злобин Д.В., Богдан О.П.,  
Сяктерев В.Н., Волков В.В.  
Методика и устройство для экспериментальной оценки  
акустического импеданса вязкоупругих сред.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 314–326.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

---

### For citation:

Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Zlobin D.V., Bogdan O.P.,  
Syakterev V.N., Volkov V.V.  
[Technique and device for the experimental estimation of the acoustic  
impedance of viscoelastic medium].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 314–326 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-314-326

## Введение

Акустические параметры упругих волн широко используются для оценки свойств материалов, в частности напряженно-деформированного и структурного состояния металла и его дефектоскопии [1–3]. Измерение характеристик вязкоупругих сред является актуальной задачей как для многих областей промышленности, так и для целей медицинской диагностики. Измерение характеристик технологических жидкостей, свойства которых изменяются с течением времени вследствие полимеризации (жидкие клеи) и в процессе использования (топливо, масло, горюче-смазочный материал), позволяет оценить их качество [3]. На оценке характеристик биологических тканей основаны методы медицинской диагностики (эластография, импедансометрия) [4], реализация которых требует знания истинных значений свойств здоровых тканей и тканей с патологическими изменениями.

Физической основой применения ультразвуковых (УЗ) методов для измерения характеристик вязкоупругой среды является функциональная связь параметров УЗ волн (скорость распространения, коэффициент затухания, акустический импеданс) с физико-химическими свойствами среды. Акустический импеданс  $Z$ , определяемый произведением плотности среды  $\rho$  на скорость волны  $C$ , является комплексной величиной и позволяет наряду с вязкостью среды оценить ее упругие свойства.

В настоящее время известен ряд физических методов, с помощью которых возможно оценивать акустический импеданс сред, в том числе и биологических. Большинство методов основано на сравнении измеряемых акустических импедансов с акустическими импедансами эталонных сред. Известные методы используют явления отражения импульсов ультразвуковых волн от границы эталонных и исследуемой сред, явления затухания нормальных волн в тонких пластинах различной толщины, погруженных в эталонную и исследуемую жидкости, и др. [3]. Большинство указанных методов требуют использования двух и более эталонных сред и наличия калиброванных акустических преобразователей. Имеет место недостаточная точность измерений для сильно поглощающих сред, а также для сред с низким значением сдвигового импеданса. В литературе имеются результаты оценки сдвиговых вязкоупругих свойств жид-

костей в области низких частот, основанные на измерении собственной частоты и добротности пьезокварцевого резонатора [5, 6], на измерении резонанса крутильных колебаний трубки, заполненной жидкостью [7, 8], на измерении сдвиговых гармонических деформаций методом ротационной реометрии [9], анализе амплитудных и фазовых характеристик продольных ультразвуковых колебаний [10].

Целью данной работы являлись разработка новой методики и установки для экспериментальной оценки продольного и сдвигового импедансов вязкоупругой среды, основанных на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, колеблющейся в исследуемой среде, и их апробация на образцах вязкоупругих сред с различным агрегатным состоянием.

## Теоретическое обоснование методики

В качестве чувствительного элемента в методике использован пьезокерамический элемент в форме пьезопластины с нанесенными на нее электродами и поляризованной в определенном направлении (продольная поляризация и сдвиговая поляризация).

Колеблющаяся пьезопластина представляет собой электромеханическую систему, исследование процессов в которой возможно с использованием метода электроакустических аналогий путем преобразования всех элементов механической системы в электрические или наоборот.

Для пьезопластины массой  $m$ , упругостью  $k$  и внутренними потерями, описываемыми силой трения  $r$ , находящейся под действием периодической силы  $F = F_0 \sin(\omega t)$ , уравнение движения относительно деформации  $x$  пьезопластины имеет вид [11]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение вынужденных электрических колебаний в электрическом колебательном контуре, состоящем из индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и активного сопротивления  $R$ , под действием напряжения  $U = U_0 \sin(\omega t)$  описывается выражением:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = U_0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

Сравнение выражений (1) и (2) показывает, что колеблющуюся пьезопластину можно заменить эквивалентной электрической схемой замещения, состоящей из чисто электрической емкости  $C_1$ , соединенной параллельно с цепочкой последовательно соединенных индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и активного сопротивления  $R$  (рисунок 1а) [10].

Электрическая емкость  $C_1$  пьезопластины толщиной  $d_p$  и площадью  $S_p$  определяется ее диэлектрическими свойствами и размерами:  $C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S_p}{d_p}$  (где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость пьезопластины;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м)).

Эквивалентная индуктивность  $L$  зависит в основном от колеблющейся массы, пьезоэлектрических и упругих свойств пьезопластины. Эквивалентная емкость  $C$  определяется упругими и пьезоэлектрическими свойствами пьезопластины. Активное эквивалентное сопротивление  $R$  складывается из сопротивления внутренних механических потерь в пьезопластине  $R_V$  и сопротивления излучения  $R_I$  в окружающую среду, соединенных последовательно.

Эквивалентная схема замещения (рисунок 1а) обладает двумя резонансами – последовательным и параллельным. Последовательный резонанс (резонанс напряжений) возникает в цепи последовательного контура, образованного емкостью  $C$  и индуктивностью  $L$ , при равенстве емкостного  $X_C$  и индуктивного  $X_L$  сопротивлений, на частоте  $f = f_r$ , определяемой формулой:  $f_r = 1/2\pi\sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

При последовательном резонансе полное сопротивление контура является чисто активным и имеет небольшую величину, равную  $R$ , при этом наблюдается минимум напряжения  $U_r$ .

Параллельный резонанс (резонанс токов) возникает в цепи параллельно включенных индуктивности  $L$  и емкости, образованной последовательным соединением емкостей  $C$  и  $C_1$ . Частота параллельного резонанса (антирезонанса) определяется формулой:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} (1 + C/C_1)}.$$

При параллельном резонансе сопротивление контура имеет чисто активный характер и значительную величину, а амплитуда напряжения  $U_a$  максимальна. В режиме излучения пьезопластина работает на частоте последовательного резонанса  $f_r$ , в режиме приема – на частоте антирезонанса  $f_a$ .

Вид амплитудно-частотной зависимости электрического напряжения  $U$  представлен на рисунке 1б. Параллельный и последовательный резонансы в амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) пьезопластины ярко выражены в тех случаях, когда потери в колебательной системе невелики (например, в свободной пьезопластине, находящейся в воздухе), при этом ее активное сопротивление  $R$  определяется только внутренними потерями  $R_V$ , а сопротивление излучения в окружающую среду  $R_I$  бесконечно мало. Если пьезопластина находится в акустическом контакте с окружающей средой ее активное сопротивление  $R$  возрастает на величину сопротивления излучения  $R_I$  за счет излучения акустической волны в окружающую среду. Сопротивление излучения  $R_I$  тем больше, чем ближе по значению акустические импедансы пьезопластины и окружающей ее среды. При этом добротность колебательной системы резко уменьшается.

Таким образом, измеряя АЧХ и определяя параметры схемы замещения свободной пьезопластины и пьезопластины в условиях нагружения на вязкоупругую среду, можно оценить ее акустический импеданс.

АЧХ может быть измерена с использованием электрической схемы, приведенной на рисунке 1а, посредством регистрации электрического напряжения  $U$  при изменении частоты электрического напряжения  $U_g$ , подаваемого через сопротивление развязки  $R_p$  с генератора на исследуемую пьезопластину.

Регистрируя частоты резонанса  $f_r$  и антирезонанса  $f_a$  и решая систему уравнений относительно  $f_a$  и  $f_r$ , можно определить эквивалентные параметры схемы замещения  $C$  и  $L$ :

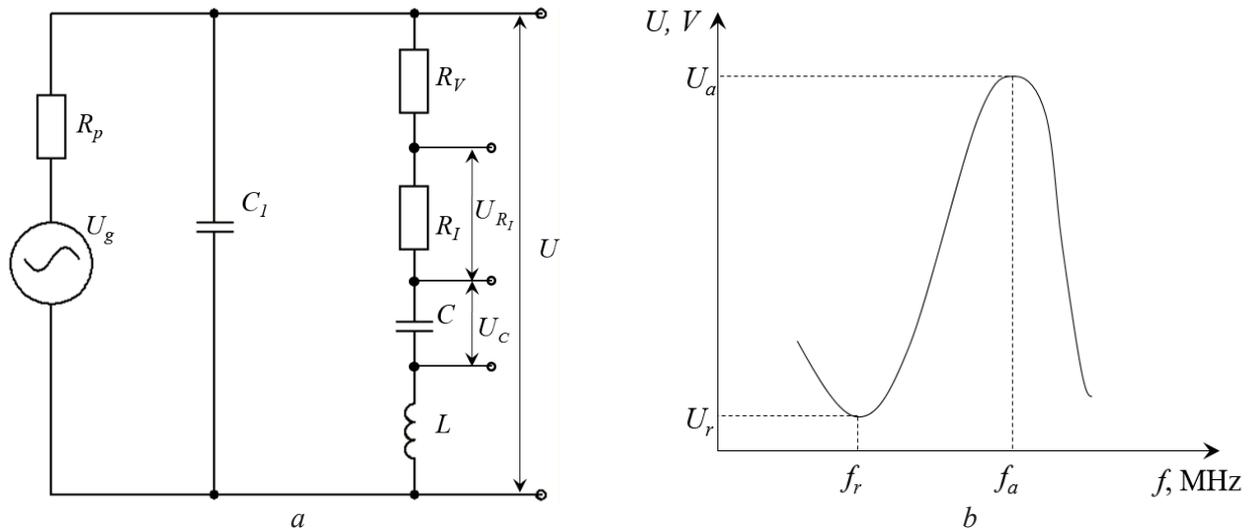
$$C = C_1 \left[ \left( \frac{f_a}{f_r} \right)^2 - 1 \right], \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{f_r^2 C 4\pi^2}. \quad (4)$$

Эквивалентное сопротивление  $R$  схемы замещения может быть найдено по измеренному значению напряжения  $U_r$  в режиме последовательного резонанса, исходя из электрической схемы (рисунок 1а), по формуле:

$$R = \frac{R_p}{\frac{U_g}{U_r} - 1}, \quad (5)$$

где  $U_g$  – напряжение, подаваемое на пьезопластину;  $R_p$  – сопротивление развязки.



**Рисунок 1** – Пьезопластина: *a* – эквивалентная электрическая схема; *b* – амплитудно-частотная характеристика  
**Figure 1** – Piezoelectric plate: *a* – equivalent circuit; *b* – amplitude frequency response

Акустический импеданс  $Z$  среды связан с мощностью акустического излучения  $P$  и амплитудой смещений в акустической волне  $A$  в режиме резонанса следующим соотношением [11]:

$$Z = \frac{2P}{4\pi^2 f_r^2 A^2 S_p}. \quad (6)$$

Мощность акустического излучения  $P$  численно равна электрической мощности при излучении и может быть определена согласно электрической схеме (рисунок 1а):

$$P = \frac{U_{R_i}^2}{R_i}, \quad (7)$$

где  $U_{R_i}$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_p$ , определяемое формулой:

$$U_{R_i} = \frac{U_r R_i}{R_v + R_i} = \frac{U_r R_i}{R}. \quad (8)$$

Сопротивление  $R_{i_p}$ , определяющее внутренние потери пьезопластины, может быть определено как эквивалентный параметр схемы замещения свободной (колеблющейся в воздухе) пьезопластины; полное активное сопротивление  $R$  – как эквивалентный параметр схемы замещения пьезопластины, нагруженной на вязкоупругие среды; сопротивление  $R_p$ , определяющее потери на излучение, находится как разность величин  $R$  и  $R_{i_p}$ .

Амплитуда акустической волны в исследуемой среде, согласно уравнениям обратного пьезоэффекта, прямопропорциональна падению напряжения  $U_c$  на емкости  $C$  с коэффициентом пропорциональности  $K$  [11]:

$$A = U_c K, \quad (9)$$

где  $U_c$  – падение напряжения на емкости  $C$ , определяемое формулой:

$$U_c = \frac{U_r}{(R_v + R_i) 2\pi f C}. \quad (10)$$

Коэффициент пропорциональности  $K$  может быть найден при определении эквивалентных параметров схемы замещения пьезопластины, нагруженной на эталонную среду с известным акустическим импедансом  $Z_s$ :

$$K = \frac{A_s}{U_{c_s}}, \quad (11)$$

где  $U_{c_s}$  – падение напряжения на емкости  $C$  при нагружении пьезопластины на эталонную среду;  $A_s$  – амплитуда акустической волны в эталонной среде, определяемая формулой:

$$A_s = \sqrt{\frac{P_s}{2\pi^2 Z_s f_{rs}^2 S_s}}, \quad (12)$$

где  $f_{rs}$  – частота последовательного резонанса при нагружении пьезопластины на эталонную среду;  $P_s$  – мощность акустического излучения в эталонную среду, определяемая выражением (7).

Подстановка в формулу (6) формул (7)–(12) дает следующую формулу для определения акустического импеданса исследуемой вязкоупругой среды:

$$Z = \frac{U_{R_i}^2 U_{c_s}^2 Z_s f_{rs}^2 R_{i_s}}{U_{R_i s}^2 U_c^2 f_r^2 R_i}, \quad (13)$$

где  $U_C$  и  $U_{C_s}$  – падение напряжения на емкости  $C$  при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды (формула (10));  $U_{R_i}$  и  $U_{R_{i_s}}$  – падение напряжения на сопротивлении  $R_i$  при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды (формула (8));  $f_r$  и  $f_{r_s}$  – измеренные частоты последовательного резонанса при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среды соответственно;  $Z_s$  – акустический импеданс эталонной среды;  $R_l = R - R_V$  и  $R_{l_s} = R_s - R_V$  – сопротивление излучения для исследуемой и эталонной сред соответственно;  $R$  и  $R_s$  – эквивалентные параметры схемы замещения (формула (5)) для исследуемой и эталонной сред соответственно;  $R_V$  – эквивалентные параметры схемы замещения (формула (5)) для свободной пьезопластины.

### Экспериментальная установка для исследований

Блок-схема установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды представлена на рисунке 2. К генератору через сопротивление развязки  $R_p$  подключается пьезопластина, работающая на продольном пьезоэффекте (пьезомодуль  $d_{33}$ ) либо сдвиговом пьезоэффекте (пьезомодуль  $d_{15}$ ). Тип поляризации

пьезопластины определяет возможность измерения продольного  $Z_l = \rho C_l$  или сдвигового  $Z_t = \rho C_t$  акустического импеданса среды. Изменяя частоту сигнала генератора  $U_g$ , подаваемого на пьезопластину, регистрируют параметры амплитудно-частотной характеристики: частоты резонанса  $f_r$  и антирезонанса  $f_a$  и соответствующие им значения минимального  $U_r$  и максимального  $U_a$  напряжения.

Согласно методике, измерение акустического импеданса вязкоупругой среды происходит в три этапа: определение параметров АЧХ ненагруженной (свободной) пьезопластины, колеблющейся в воздухе; определение параметров АЧХ той же пьезопластины, погруженной в эталонную среду; определение параметров АЧХ той же пьезопластины, погруженной в исследуемую среду.

Измеренные параметры АЧХ для свободной пьезопластины позволяют определить сопротивление  $R_V$  внутренних потерь; для пьезопластины в эталонной среде – входящие в формулу (13) значения падения напряжений  $U_{C_s}$  и  $U_{R_{i_s}}$ , частоты последовательного резонанса  $f_{r_s}$ , эквивалентного параметра схемы замещения  $R_{l_s}$ ; для пьезопластины в исследуемой вязкоупругой среде – входящие в формулу (13) значения  $U_C$ ,  $U_{R_i}$ ,  $f_r$ ,  $R_l$ .

Характеристики пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

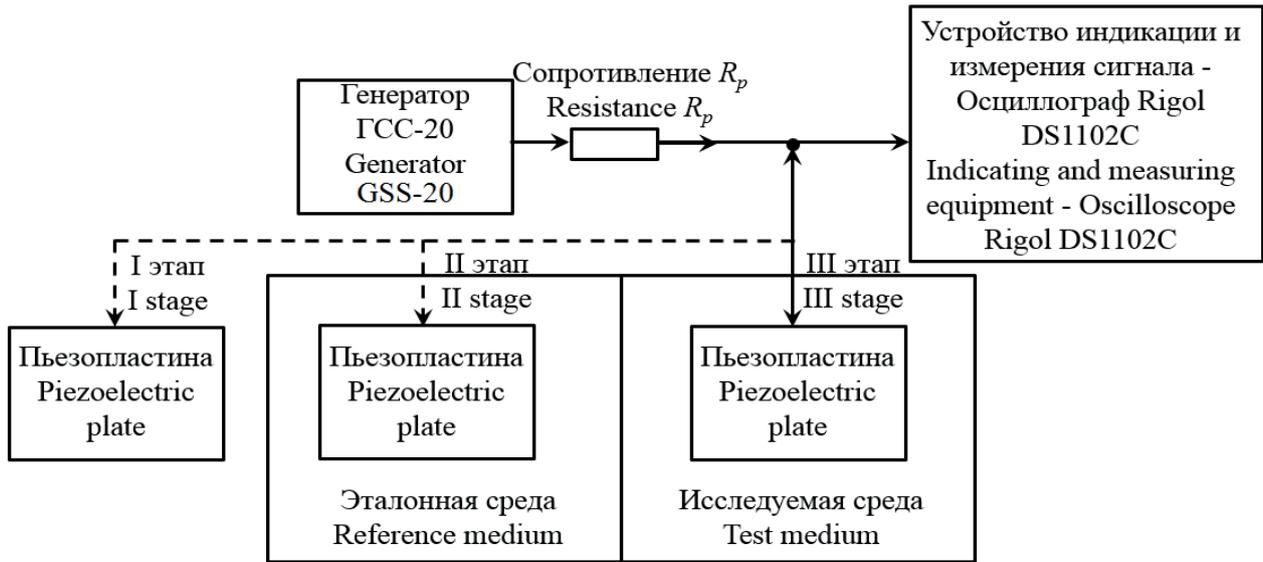
### Характеристики пьезопластин Characteristics of piezoelectric plates

Материал Material	Тип Type	Размеры, мм Dimensions, mm	Электрическая емкость $C_1$ , нФ Electrical capacitance $C_1$ , nF	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> Density $\rho$ , kg / m <sup>3</sup>	Пьезомодуль $d_{33}$ , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н Piezomodule $d_{33}$ , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н	Пьезомодуль $d_{15}$ , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н Piezomodule $d_{15}$ , 10 <sup>-12</sup> Кл/Н	Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon$ Relative capacitivity $\epsilon$
ЦТС-19	продольная поляризация longitudinal polarization	20 × 20 × 1	5,8	7740	200	–	1725
PIC050	сдвиговая поляризация shear polarization	18 × 18 × 0,75	6,9	4700	40	80	60

В качестве эталонной среды с известным продольным импедансом использована вода ( $Z_l = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м), эталонной среды с известным сдвиговым импедансом – эпоксидная смола ( $Z_t = 1,59 \cdot 10^6$  Па·с/м) при температуре 20 °С.

С целью повышения точности и достоверности методики оценки акустического импеданса

исследовано влияние сопротивления развязки  $R_p$  и размера пьезопластины на точность определения основных параметров АЧХ. Исследования показали, что увеличение сопротивления  $R_p$  приводит к уменьшению регистрируемых напряжений на частотах резонанса и антирезонанса, при этом происходит сглаживание резонансов, что

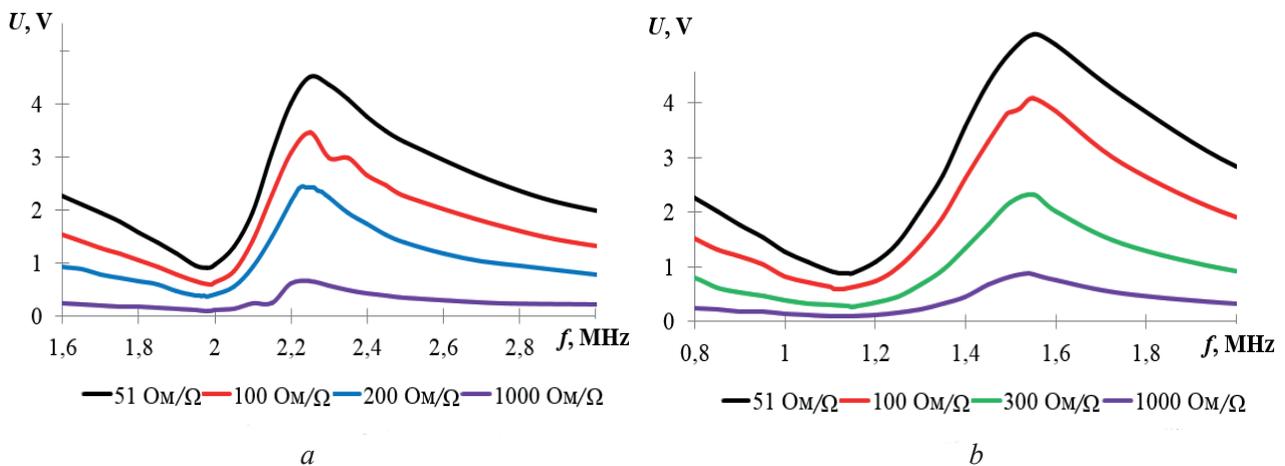


**Рисунок 2** – Блок-схема установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды

**Figure 2** – Block diagram of the installation for the experimental evaluation of the acoustic impedance of the medium

приводит к снижению точности определения измеряемых параметров, особенно для сред с высоким акустическим импедансом (рисунок 3). Максимальное значение амплитуды на частоте антирезонанса  $f_a$  имеет место при малых сопро-

тивлениях развязки (50–300 Ом), при этом минимум амплитуды на частоте резонанса  $f_r$  является наиболее выраженным. Нижний предел сопротивления развязки 50 Ом ограничен выходным сопротивлением генератора.



**Рисунок 3** – Влияние сопротивления развязки на амплитудно-частотную характеристику пьезопластин: *a* – пьезопластина с продольной поляризацией, нагруженная на воду; *b* – пьезопластина со сдвиговой поляризацией, нагруженная на эпоксидную смолу

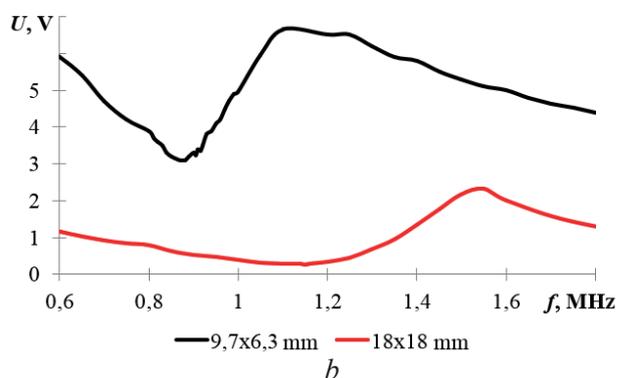
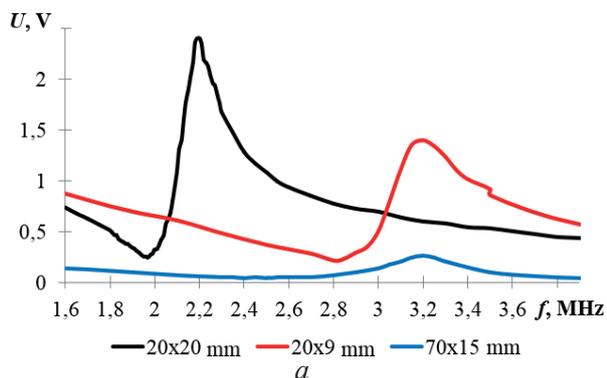
**Figure 3** – The influence of the isolation resistance on the amplitude-frequency characteristic of piezoelectric plates: *a* – piezoelectric plate with longitudinal polarization loaded on water; *b* – piezoelectric plate with shift polarization loaded on epoxy resin

Результаты исследования влияния размера пьезопластины, нагруженной на эталонные среды, на характер АЧХ представлены на рисунке 4. Частоты резонанса и антирезонанса определяются толщиной пьезопластины, при этом соответствующие им амплитуды напряжений наиболее

ярко выражены для пьезопластин с равными сторонами. Для пьезопластин с неравными сторонами возможно возникновение дополнительных резонансов в АЧХ пьезопластины, что снижает достоверность методики оценки импеданса. Так как резонансные свойства пьезопластин могут

отклоняться от номинальных даже в пределах одной партии, все три этапа измерений следует

проводить с использованием одной и той же пьезопластины.



**Рисунок 4** – Влияние размера пьезопластины на ее амплитудно-частотную характеристику ( $R_p = 300 \text{ Ом}$ ): *a* – пьезопластина с продольной поляризацией, нагруженная на воду; *b* – пьезопластина со сдвиговой поляризацией, нагруженная на эпоксидную смолу

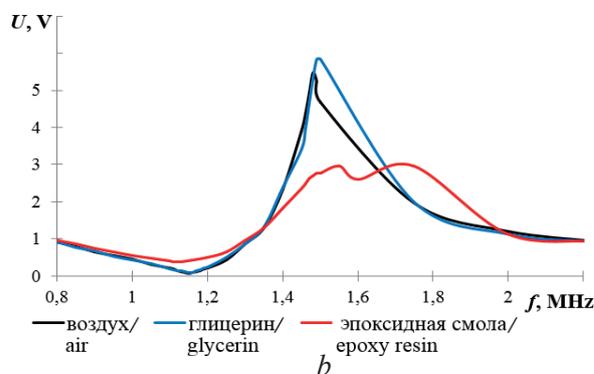
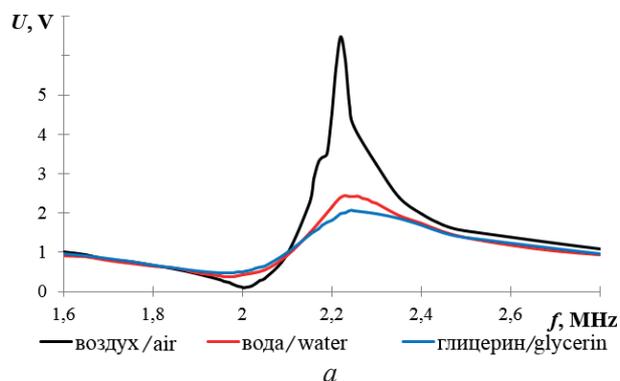
**Figure 4** – The influence of the size of the piezoceramic plate on the amplitude-frequency response ( $R_p = 300 \text{ }\Omega$ ): *a* – piezoelectric plate with longitudinal polarization loaded on water; *b* – piezoelectric plate with shift polarization loaded on epoxy resin

## Результаты и обсуждение

Результаты измерения АЧХ для пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией в свободном состоянии, нагруженных на эталонные среды (вода и эпоксидная смола после отверждения) и исследуемую среду – глицерин, представлены на рисунке 5. Для пьезопластины с продольной поляризацией (рисунок 5*a*) наибольшая амплитуда  $U_a = 6,54 \text{ В}$  на частоте антирезонанса  $f_a = 2,21 \text{ МГц}$  и наименьшая  $U_r = 0,104 \text{ В}$  на частоте резонанса  $f_r = 2,01 \text{ МГц}$  наблюдается в случае нагружения пьезопластины на воздух с наименьшим значением акустического импеданса  $Z_l = 417 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ . Для глицерина, имеющего максимальное среди исследуемых жидкостей значение акустического импеданса  $Z_l = 2,42 \cdot 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$ , наоборот ампли-

туда при резонансе имеет максимальное значение  $U_r = 0,47 \text{ В}$ , а при антирезонансе – минимальное  $U_a = 2,07 \text{ В}$ . При этом наблюдается увеличение частоты антирезонанса ( $f_a = 2,24 \text{ МГц}$ ) и уменьшение частоты резонанса ( $f_r = 1,97 \text{ МГц}$ ). Для пьезопластины с продольной поляризацией, помещенной в эталонную среду (вода) со значением продольного импеданса  $Z_p$ , находящегося между значениями для воздуха и глицерина, параметры АЧХ имеют промежуточные значения в сравнении с АЧХ пьезопластины, находящейся в воздухе и в глицерине.

Для пьезопластины со сдвиговой поляризацией, нагруженной на воздух, глицерин и эпоксидную смолу, наблюдается аналогичная картина: чем больше сдвиговый акустический импеданс среды, тем выше напряжение на резонансной частоте, при этом ее значение уменьшается.



**Рисунок 5** – Амплитудно-частотные характеристики пьезопластин с продольной (*a*) и сдвиговой (*b*) поляризацией, нагруженных на разные среды ( $R_p = 200 \text{ Ом}$ )

**Figure 5** – Amplitude frequency response of the piezoelectric plates with longitudinal (*a*) and shear (*b*) polarization loaded on different media ( $R_p = 200 \text{ }\Omega$ )

Значения измеренных параметров АЧХ ( $f_a, f_p, U_p$ ) и рассчитанных согласно описанной методике электрических параметров эквивалентной схемы заме-

щения для пьезопластин с продольной и сдвиговой поляризацией, нагруженных на воздух, эталонную и исследуемую среды представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры амплитудно-частотной характеристики и эквивалентные параметры схемы замещения пьезопластины, нагруженной на различные среды, в режиме резонанса**  
**Parameters of the amplitude-frequency response and equivalent parameters of the circuit for replacing a piezoelectric plate loaded on various media in resonance mode**

Пьезопластина с продольной поляризацией ЦТС-19 20 × 20 × 1 мм, C <sub>1</sub> = 5,8 нФ Piezoelectric plate with longitudinal polarization ЦТС-19 20 × 20 × 1 mm, C <sub>1</sub> = 5,8 nF									
Среда Medium	$f_p$ , MHz	$f_a$ , MHz	$U_p$ , V	$R$ , Ω	$R_i$ , Ω	$C$ , nF	$L$ , μH	$U_c$ , V	$U_{R_i}$ , V
Воздух (внутренние потери $Z_i = 417$ Па·с/м) Air (internal loss $Z_i = 417$ Pa·s/m)	2,01	2,22	0,104	2,06	–	1,25	5,05	–	–
Вода (эталонная среда $Z_i = 1,5 \cdot 10^6$ Па·с/м) Water (reference fluid $Z_i = 1,5 \cdot 10^6$ Pa·s/m)	1,98	2,23	0,380	7,81	5,75	1,45	4,46	2,69	0,28
Глицерин (исследуемая среда $Z_i = 2,42 \cdot 10^6$ Па·с/м) Glycerin (test medium $Z_i = 2,42 \cdot 10^6$ Pa·s/m)	1,97	2,24	0,470	9,86	7,80	1,65	3,98	2,33	0,37
Пьезопластина со сдвиговой поляризацией PIC050 18 × 18 × 0,75 мм, C <sub>1</sub> = 6,9 нФ Piezoelectric plate with shift polarization PIC050 18 × 18 × 0,75 mm, C <sub>1</sub> = 6,9 nF									
Воздух (внутренние потери) Air (internal loss)	1,15	1,48	0,07	1,37	–	4,53	4,23	–	–
Эпоксидная смола (эта- лонная среда $Z_i = 1,59 \cdot 10^6$ Па·с/м) Epoxy resin (reference fluid $Z_i = 1,59 \cdot 10^6$ Pa·s/m)	1,13	1,55	0,39	8,08	6,71	6,32	3,19	1,07	0,32
Глицерин (исследуемая среда) Glycerin (test medium)	1,15	1,5	0,09	1,78	0,41	4,68	4,09	1,46	0,02

Анализ значений параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины показывает, что увеличение акустического импеданса окружающей пьезопластину среды ведет к существенно увеличению сопротивления излучения, что обусловлено лучшим согласованием материала пьезопластины и среды по акустическому импедансу, при этом эквивалентная емкость  $C$ , определяемая упругими свойствами пьезопластины, увеличивается, особенно существенно в случае пьезопластины со сдвиговой поляризацией, а эквивалентная индуктивность  $L$ , определяемая

колеблющейся массой, уменьшается, что обусловлено влиянием присоединенной массы окружающей среды.

Случайные погрешности измерений параметров АЧХ по результатам 5 измерений составили: для напряжения в области резонанса в случае пьезопластины, находящейся в воздухе, 7 %, для пьезопластины, нагруженной на воду, – 2 %; для частот резонанса и антирезонанса – менее 1 %. Случайная погрешность оценки продольного импеданса составила 10 %, сдвигового импеданса – 25 %.

Таблица 3 / Table 3

Продольный и сдвиговый акустические импедансы, скорости и модули упругости исследуемых сред  
Longitudinal and shear acoustic impedances, elastic moduli and velocity of test mediums

Среда Medium	Акустический импеданс, $10^6$ , Па·с/м эксп. / спр. Acoustic impedances, $10^6$ , Pa·s/m exp. / ref.		Плотность $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> Density $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Скорость УЗ волны эксп. / спр. Velocity of ultrasonic wave exp. / ref.		Модуль объем- ной упругости $K$ , ГПа эксп. / спр. Modulus of compression $K$ , ГПа exp. / ref.	Модуль сдвига $G$ , МПа эксп. / спр. Shear modulus $G$ , MPa exp. / ref.	Модуль Юнга $E$ , МПа эксп. / спр. Elasticity modulus $E$ , MPa exp. / ref.	Коэффициент Пуассона $\nu$ эксп. / спр. Poisson ratio $\nu$ exp. / ref.
	продольный $Z_l$ shear $Z_t$	сдвиговый $Z_t$ shear $Z_t$		$C_p$ м/с longitudinal $C_p$ , m/s	$C_s$ м/с shear $C_s$ m/s				
Глицерин / Glycerin	2,8/2,4	0,04 / –	1260	2230 / 1900	31 / –	6,26 / 4,65	1,27 / –	3,81 / –	0,49984 / 0,5
Ацетон / Acetone	0,8 / 0,9	–	790	1040 / 1190	–	0,85 / 1,08	–	–	0,5
Спирт / Alcohols	1,1 / 0,9	–	790	1410 / 1150	–	1,56 / 1,09	–	–	0,5
Архитектурный пластилин / Architectural plasticine	2,4 / 2,32 [12]	0,48 / 0,59 [12]	1340 [12]	1780 / 1730	360 / 440	4,03 / 3,67	170 / 260	510 / 760	0,46912 / 0,44987
Клей Момент Монтаж Особо- прочный МР-55, до полимеризации Adhesive Moment Mounting Extra-strong МР-55, before polymerization	3,5 / –	0,14 / –	1260	2780 / –	110 / –	9,70 / –	15,6 / –	46,6 / –	0,49879 / –
Клей Момент Монтаж Особо- прочный МР-55, полимеризация 3 сут. Adhesive Moment Mounting Extra- strong МР-55, polymerization 3 day	4,5 / –	0,45 / –	1260	3590 / –	360 / –	16,07 / –	160 / –	480 / –	0,49256 / –
Герметик силиконовый универ- сальный «Экон», до полимеризации Silicone Universal Sealant «Ekon», before polymerization	0,97 / –	0,047 / –	980	990 / –	48 / –	0,96 / –	2,25 / –	6,76 / –	0,49824 / –
Герметик силиконовый универ- сальный «Экон», полимеризация 7 сут. Silicone Universal Sealant «Ekon», polymerization 7 day	1,3 / –	0,060 / –	980	1280 / –	61 / –	1,59 / –	3,67 / –	11,01 / –	0,49827 / –

Результаты оценки продольного и сдвигового акустических импедансов для ряда исследуемых сред: глицерин, ацетон, спирт, архитектурный пластилин, герметик силиконовый универсальный «Экон», клей «Момент Монтаж Особопрочный МР-55» до и после полимеризации и их справочные значения представлены в таблице 3.

Продольный  $Z_l$  и сдвиговый  $Z_t$  акустические импедансы сред связаны с упругими модулями среды (модуль объемной упругости  $K$ , модуль Юнга  $E$ , модуль сдвига  $G$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ ) [11]:

$$\nu = \frac{Z_l^2 - 2Z_t^2}{2(Z_l^2 - Z_t^2)}, \quad G = Z_t^2 / \rho, \quad E = Z_l^2 / \rho \frac{3 - 4Z_t^2 / Z_l^2}{1 - Z_t^2 / Z_l^2}, \quad K = \frac{Z_l^2}{3\rho} (3 - 4Z_t^2 / Z_l^2).$$

В таблице 3 приведены также результаты оценки упругих модулей исследуемых сред по измеренным значениям их акустических импедансов.

Из данных таблицы 4, в частности, следует, что в процессе полимеризации клея «Момент Монтаж Особопрочный МР-55» продольный акустический импеданс увеличился почти на 30 %, а сдвиговый акустический импеданс вырос почти в три раза. Аналогичные значения для силиконового герметика составили 34 % для продольного акустического импеданса и 28 % для сдвигового акустического импеданса. Наряду с измеренными, в таблице 3 приведены справочные данные импедансов, скоростей УЗ волн и упругих модулей для некоторых сред. Наблюдается удовлетворительное согласование полученных значений акустических импедансов исследованных сред с их справочными данными. Прочерки в графе экспериментальных значений означают невозможность оценки сдвигового импеданса сред с низкой сдвиговой упругостью. Прочерки в графе справочных значений означают их отсутствие в литературных источниках. Отметим, что представленные в таблице экспериментальные значения скоростей продольных УЗ волн  $C_l$  для исследуемых сред подтверждены их измерением эхо-импульсным методом с использованием УЗ дефектоскопа УД 9812 Уралец. Наблюдаемые отклонения измеренных значений от справочных могут быть обусловлены наличием различных примесей в исследуемых средах, а также погрешностями измерения. Полученные впервые значения сдвигового акустического импеданса, сдвиговой скорости звука и сдвиговых модулей исследуемых сред удовлетворительно

$$Z_l = \rho C_l = \sqrt{\frac{3\rho K(1-\nu)}{(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\rho E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (14)$$

$$Z_t = \rho C_t = \sqrt{\rho G} = \sqrt{\frac{3\rho KE}{9K - E}}. \quad (15)$$

Решение системы уравнений (17) – (18), позволяет вычислить значения упругих модулей исследуемых сред:

согласуются с известными данными для других вязкоупругих сред: нефть [7–9] в диапазоне температур от  $-10$  °С до  $60$  °С ( $Z_l \approx 0,005 \cdot 10^6$  Па с/м,  $C_t \approx 5,6$  м/с,  $G \approx 1 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^3$  Па), буровые растворы [5] ( $G \approx 3 \cdot 10^6$  Па), диэтиленгликоль и вазелиновое масло в диапазоне частот  $40-74$  кГц [6] ( $G \approx 0,51-1,22 \cdot 10^5$  Па и  $G \approx 1,13-1,36 \cdot 10^5$  Па), архитектурный пластилин [12] ( $Z_l \approx 0,59 \cdot 10^6$  Па с/м).

## Заключение

Представленные в статье установка и методика измерений позволяют проводить оценку продольного и сдвигового акустических импедансов вязкоупругих сред, вычислять скорости УЗ волн и значения их упругих модулей. Описанная методика достаточно проста в реализации и может быть воспроизведена с помощью несложного лабораторного оборудования. Полученные значения акустических импедансов исследованных сред удовлетворительно согласуются с их справочными данными. Существенно, что в отличие от известных методов определения акустического импеданса разработанная методика позволяет с достаточной точностью оценивать трудно поддающийся измерению на высоких частотах параметр сдвигового импеданса вязкоупругих сред, определяющий модуль сдвига материала и характеризующий его сопротивление сдвиговым деформациям.

Определение акустических характеристик технологических сред, свойства и качество которых изменяются с течением времени (моторные масла, технические смазочные материалы и др.), представляется актуальным в задачах управления технологическими процессами и т.д. Перспек-

тивным представляется использование разработанной методики для оценки свойств биологических тканей *in vitro*, что позволит повысить информативность методов ультразвуковой медицинской диагностики. Существенным является возможность оценки акустических свойств сред в процессе полимеризации. Исследование закономерностей изменения свойств полимерных материалов (силиконовая резина, полиуретан, полиэтилен, поливинилхлорид, полиамид и др.) важно в аспекте создания новых материалов для медицинского протезирования, при конструировании и производстве медицинских изделий и фантомов биологических сред.

Следует отметить, что разработанная методика может быть использована для измерения импедансов как ньютоновских, так и неньютоновских сред, при этом АЧХ пьезопластин, нагруженных на подобные среды, может существенно меняться в зависимости от степени отклонения от законов, описываемых уравнениями Навье-Стокса.

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/6.7 по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФБГОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

## Список используемой литературы

1. Муравьев, В.В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В.В. Муравьев, К.А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270. doi:10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
2. Муравьев, В.В. Контроль структурного состояния сталей с помощью акустических шумов / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, А.И. Дедов, А.В. Байтерьяков // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2 (9). – С. 60–66.
3. Чуприн, В.А. Контроль жидких сред с применением ультразвуковых нормальных волн / В. А. Чуприн. – М. : Спектр, 2015. – 218 с.
4. Хилл, К. Ультразвук в медицине. Физические основы применения / К. Хилл, Дж. Бэмбер, Г. тер Хаар; пер. с англ. – М. : Физматлит, 2008. – 544 с.
5. Бадмаев, Б.Б. Вязкоупругая релаксация в жидкостях / Б.Б. Бадмаев, Б.Б. Дамдинов, Т.С. Дембелова // Известия российской академии наук. Серия физическая. – 2015. – Т. 79. – № 10. – С. 1301–1305. doi: 10.3103/S1062873815100044
6. Бадмаев, Б.Б. Сдвиговая упругость и прочность структуры жидкости на примере диэтиленгликоля / Б.Б. Бадмаев, Т.С. Дембелова, Д.Н. Макарова, Ч.Ж. Гул-

генов // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 1. – С. 18–21. doi: 10.1134/S1063784217010042

7. Есипов, И.Б. Медленная кинетика нелинейности вязкоупругих свойств нефти при сдвиговых колебаниях / И.Б. Есипов, О.М. Зозуля, М.А. Миронов // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 2. – С. 166–172. doi: 10.1134/S1063771014020031

8. Миронов, М.А. Медленная кинетика вязкоупругих свойств нефти при низкочастотных сдвиговых колебаниях / М.А. Миронов, И.А. Шеломихина, О.М. Зозуля, И.Б. Есипов // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 1. – С. 132–140. doi: 10.1134/S1063771014020031

9. Есипов, И.Б. Резонансный метод измерения сдвиговых вязкоупругих свойств жидких сред на основе возбуждения крутильных колебаний в трубках / И.Б. Есипов, О.М. Зозуля, А.В. Фокин // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 1. – С. 124–13. doi: 10.1134/S1063771010010161

10. Korobko, E. The Peculiarities of Ultrasound Wave Propagation in Magnetorheological Fluid with Complex Dispersive Phase / E. Korobko [et al.] // Vibroengineering. – 2015. – Vol. 6. – P. 326–329.

11. Шарапов, В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.

12. Колесников, Ю.И. Об определении упругих констант высокопластичных материалов / Ю.И. Колесников, С.С. Борода // Физическая мезомеханика. – 2009. – № 12. – С. 121–126.

## References

1. Muraviev V.V., Tapkov K.A. [Evaluation of strain-stress state of the rails in the production]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270 (in Russian). doi:10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270
2. Muraviev V.V., Muravieva O.V., Dedov A.I., Baiteryakov A.V. [Monitoring of the metal structural state by acoustical structural noise]. *Devices and Methods of Measurements*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 60–66 (in Russian).
3. Chuprin V.A. *Kontrol' zhidkikh sred s primeneniem ul'trozvukovykh normal'nykh voln* [Monitoring of liquid media using ultrasonic normal waves]. Moscow, LLC Publishing house SPEKTR, 2015, 218 p. (in Russian).
4. Hill C.R., Bamber J.C., ter Haar G.R. *Ul'trazvuk v meditsine. Fizicheskie osnovy primeneniya* [Ultrasound in medicine. Physical bases of application: Trans. with English]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 544 p. (in Russian).
5. Badmaev B.B., Damdinov B.B., Dembelova T.S. [Viscoelastic relaxation in fluids]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 10, pp. 1301–1305 (in Russian). doi: 10.3103/S1062873815100044
6. Badmaev B.B., Dembelova T.S., Makarova D.N., Gulgenov C.Z. [Shear elasticity and strength of the liquid

structure by an example of diethylene glycol]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 14–17 (in Russian).

**doi:** 10.1134/S1063784217010042

7. Esipov I.B., Zozulya O.M., Mironov M.A. [Slow nonlinearity kinetics of the viscoelastic properties of oil during shear vibrations]. *Acoustical Physics*, 2014, vol. 60, no. 2, pp. 169–174 (in Russian).

**doi:** 10.1134/S1063771014020031

8. Mironov M.A., Shelomikhina I.A., Esipov I.B., Zozulya O.M. [Slow kinetics of viscoelastic properties of oil at low-frequency shear vibrations]. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, no. 1, pp. 117–124 (in Russian).

**doi:** 10.1134/S1063771014020031

9. Esipov I.B., Fokin A.V., Zozulya O.M. [Resonance method of measuring shear viscoelastic

properties of liquid media based on excitation of torsional oscillations in tubes]. *Acoustical Physics*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 115–125 (in Russian).

**doi:** 10.1134/S1063771010010161

10. Korobko E., Baev A., Bubulis A., Kuzmin V., Novikova Z., Novik E. The Peculiarities of Ultrasound Wave Propagation in Magnetorheological Fluid with Complex Dispersive Phase. *Vibroengineering*, 2015, vol. 6, pp. 326–329.

11. Sharapov V.M., Musiyenko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric transducers]. Moscow, Technosphere Publ., 2006, 632 p. (in Russian).

12. Kolesnikov Yu.I., Boroda S.S. [On the determination of elastic constants of highly plastic materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2009, no. 12, pp. 121–126 (in Russian).

УДК 535.317

## Расчет светозащитной бленды двухзеркального зафокального объектива

Самбрано Л.Ф.<sup>1,2</sup>, Артюхина Н.К.<sup>1</sup>, Пероса Л.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

<sup>2</sup>Национальный центр оптических технологий  
пр-т Лос Процерес, сектор Ла Педрегоса, корпус 4, г. Мериды 5101, Венесуэла

Поступила 06.10.2017

Принята к печати 23.11.2017

В последнее время усилия по совершенствованию оптических характеристик зеркальной оптики направлены на использование канонических зеркальных схем, содержащих асферические поверхности и обладающих коррекционными возможностями аберраций. При этом большое внимание уделяется разработке новых оптических систем двухзеркальных объективов. Одним из перспективных направлений наряду с повышением качества изображения объективов является разработка мероприятий для защиты плоскости изображения от попадания постороннего света и вредных потоков при минимальном виньетировании и экранировании. Единственным методом устранения или хотя бы уменьшения этих неконструктивных лучей является установка светозащитных бленд. Целью работы являлось усовершенствование методики построения бленды и создание алгоритма расчета построения бленды для защиты плоскости изображения на основе двухзеркальных зафокальных объективов.

Исследование проводилось в два этапа. В ходе первого этапа получены положения плоскостей экранирования и промежуточного изображения, а также коэффициент центрального экранирования. На втором этапе предложено конструктивное расположение бленды, получены соответствующие формулы расчета путем геометрических построений, составлен алгоритм расчета. Установлена связь коэффициента линейного экранирования с расстоянием между поверхностями зеркал и высотами нулевых лучей. Представлена диаграмма виньетирования для двухзеркального зафокального объектива с относительным отверстием  $D/f = 1 : 1,3$  и угловым полем  $2\omega = 4^\circ$ : виньетирование для наклонных пучков лучей порядка  $k_Q = 0,56$ .

**Ключевые слова:** зеркальный объектив, бленда, вредный свет, виньетирование.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

---

**Адрес для переписки:**

Самбрано Л.Ф.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: luzzambrano73@mail.com

**Address for correspondence:**

Zambrano L.F.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: luzzambrano73@mail.com

---

**Для цитирования:**

Самбрано Л.Ф., Артюхина Н.К., Пероса Л.В.  
Расчет светозащитной бленды двухзеркального  
зафокального объектива.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 327–333.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

**For citation:**

Zambrano L.F., Artyukhina N.K., Peroza L.V.  
[Calculation of a glare stop for two-mirror extra-focal objective].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 327–333 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

# Calculation of a glare stop for two-mirror extra-focal objective

Zambrano L.F.<sup>1,2</sup>, Artyukhina N.K.<sup>1</sup>, Peroza L.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

<sup>2</sup>National Center of Optical Technologies,  
Los Proceres Ave, sector La Pedregosa, Merida 5101, Venezuela

Received 06.10.2017

Accepted for publication 23.11.2017

## Abstract

Recently, efforts to improve optical characteristics in canonical mirror systems, including aspherical surfaces and corrective aberration capabilities. At the same time, much attention is paid to the development of new optical schemes of two-mirror objectives. Development measures to protect the image plane from stray light and harmful flows with minimal vignetting and screening is one of the most perspective ways for improving the image quality objectives. The only method to eliminate or even reduce these non-constructive rays is to set glare stops. The aim of the work was an improving method for constructing a glare stop to protect the image plane and the creation of a calculation algorithm of glare stop for protecting the image plane based on two-mirror extra-focal objectives.

The study was conducted in two stages. In the course of the first stage, the positions of screening and intermediate image plane were obtained, as well as the central screening coefficient. At the second stage, an arrangement for the position of glare stop is proposed using the algorithm calculation. Thus, mathematical expressions were achieved by geometric constructions. The relation of the screening coefficient with the distance between the surfaces of the mirrors and the height of the paraxial rays is established. A representation of vignetting diagram for two-mirror extra-focal objective with  $D/f' = 1 : 1,3$  and  $2\omega = 4^\circ$  was realized. The estimation of vignetting of inclined light beams is  $k_Q = 0,56$ .

**Keywords:** mirror objective, glare stop, harmful light, vignetting, light scattering.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

---

### Адрес для переписки:

Самбрано Л.Ф.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: luzzambrano73@mail.com

### Address for correspondence:

Zambrano L.F.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: luzzambrano73@mail.com

---

### Для цитирования:

Самбрано Л.Ф., Артюхина Н.К., Пероза Л.В.  
Расчет светозащитной бленды двухзеркального  
зафокального объектива.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С.327–333.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

### For citation:

Zambrano L.F., Artyukhina N.K., Peroza L.V.  
[Calculation of a glare stop for two-mirror extra-focal objective].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 327–333(in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-327-333

## Введение

В последнее время усилия по совершенствованию оптических характеристик зеркальной оптики направлены на использование канонических зеркальных схем, содержащих асферические поверхности, которые позволяют улучшить коррекцию aberrаций. При этом большое внимание уделяется разработке новых оптических систем двухзеркальных объективов. Одним из перспективных направлений, наряду с повышением качества изображения объективов, является разработка мероприятий для защиты плоскости изображения от попадания постороннего света и вредных потоков при минимальном виньетировании и экранировании [1]. Единственным методом устранения или хотя бы уменьшения этих неконструктивных лучей является установка светозащитных бленд.

По существу, светозащитная блenda представляет собой вспомогательную диафрагму, блокирующую рассеянное излучение [2]. Основные параметры бленд: радиусы входной  $R_{b(i)}$  и выходной  $R_{b(o)}$  бленды; длина  $l_b$ ; половина углового поля зрения  $\omega$  и угол  $\gamma$  луча прямой засветки, проходящего через кромки входного и выходного окон бленды [3]. Для эффективного применения зеркальных поверхностей требуется изменение конструкции бленды так, чтобы большая часть света была отражена обратно в пространство через входное отверстие бленды [4]. Некоторые авторы используют термин «бленда» для описания конических или трубчатых элементов, устанавливаемых на пути лучей через систему [5]. Использование светозащитных бленд, имеющих конический корпус, представлено в работах [6–7].

Дополнительным существенным недостатком зеркальных объективов является виньетирование, ограничивающее наклонные пучки лучей. Принимая во внимание тот факт, что Гауссова оптика позволяет лишь приближенно оценить количество света, проходящего через систему, для точной оценки виньетирования необходимо определить, пройдет тот или иной луч через всю систему. Для этого применяется расчет хода реальных лучей.

Целью работы являлось усовершенствование методики и создание алгоритма расчета построения бленды для защиты плоскости изображения на основе двухзеркальных зафокальных объективов, в том числе оценка виньетирования наклонных пучков с помощью диаграммы виньетирования.

## Оптическая схема двухзеркального зафокального объектива

В работе проведено исследование чисто зеркального объектива зафокального типа со следующими оптическими характеристиками: поле зрения  $2\omega = 4^\circ$ , относительное отверстие  $1 : 1,3$  и фокусное расстояние  $f = -100$  мм.

На рисунке 1 представлен двухзеркальный зафокальный объектив с промежуточным изображением, которое формируется в фокальной плоскости первого зеркала [8]. В данном объективе лучи имеют одно отражение от каждого из зеркал. Значение свободного коррекционного параметра  $\alpha_2$ , влияющего на конструктивное решение системы, можно определить с помощью следующей формулы:

$$\alpha_2 = \frac{h_1 - h_2}{\alpha_1},$$

где  $h_1$  – нулевая высота первого отражения;  $h_2$  – нулевая высота второго отражения (для первого луча);  $d_1$  – расстояние между поверхностями.

Сначала установлены условия нормировки для первого параксиального луча:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 = -1, h_1 = 1, h_2 < 0.$$

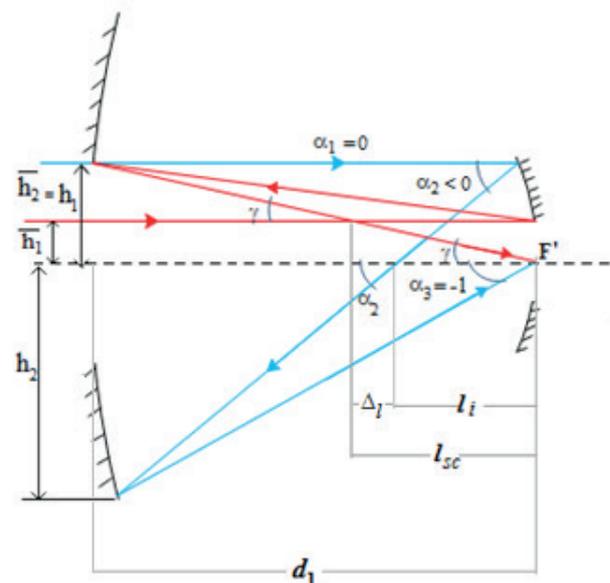


Рисунок 1 – Оптическая схема зафокального объектива с ходом двух параксиальных лучей

Figure 1 – Optical scheme of the extra-focal objective with the ways of two paraxial rays

Рассмотрим вариант, когда зеркала имеют равные по абсолютной величине радиусы:

$$|r_1| = |r_2|.$$

Параметрический расчет определяется тремя параметрами  $r_1, d_1, h_2$ :

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; h_2 = \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2}; d_1 = \frac{2\alpha_2 - 1}{\alpha_2^2}.$$

**Конструктивные параметры зафокального объектива**  
**Adjustable parameters extra-focal objective**

$\alpha_2$	$r_1 = -r_2$	$h_1$	$h_2$	$d_1$	Световой диаметр $D$ Objective diameter $D$
-1,618 (безразмерный) (adimensional)	-123,6 mm	38,46 mm	-62,23 mm	-161,8 mm	76,92 mm

Таблица 1 / Table 1

**Методика построения бленды для защиты плоскости изображения в двухзеркальных объективах**

Для выбора наиболее целесообразной расстановки трубок или диафрагм необходимо учитывать основные принципы построения светозащитных бленд [9]:

1) специальные защитные бленды, конические раструбы или трубки устанавливаются на оправы или вставляются в отверстия зеркал таким образом, чтобы они не уменьшали относительное отверстие зеркального объектива;

2) в двухзеркальной системе с главным большим зеркалом (прямая система) бленду можно размещать около внутренней границы большого зеркала с помощью трубки конической формы, защищающей изображение от вредных потоков;

3) цилиндрические бленды в пространстве предметов, которые задерживают достаточно много вредных пучков лучей, мало виньетируют полезные потоки, но удлиняют систему, что является конструктивным недостатком;

4) по чертежу оптической схемы определяется наиболее целесообразная расстановка заслонов и трубок.

Для анализа целесообразного расположения бленды в такой системе с помощью двух лучей были получены соответствующие формулы расчета путем геометрических построений. Методика расчета защиты изображения осуществлялась в два этапа.

**Расчет положения плоскостей экранирования и промежуточного изображения**

В ходе первого этапа получены положения плоскостей экранирования  $l_{sc}$  и промежуточного изображения  $l_p$ , а также коэффициент экранирова-

ния  $\varepsilon$  при применении геометрических построений с помощью условий нормировки:  $h_1 = 1, \alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 = -1, f = 1/\alpha_3$ , (для первого луча). При исследовании экранирования будем считать, что,  $\bar{h}_1$  – нулевая высота первого отражения и  $\bar{h}_2$  – нулевая высота второго отражения для луча, определяющего центральное экранирование в системе.

Коэффициент центрального экранирования определяется из соотношений:

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{h}_1}{h_1} = \bar{h}_1, \varepsilon_2 = \frac{\bar{h}_2}{|h_2|} = \frac{1}{|h_2|},$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент экранирования, который представляет собой отношение высот первого и второго (экранированного) лучей при первом отражении, и  $\varepsilon_2$  – в случае второго отражения;  $\bar{h}_2 = h_1 = 1$ . Ввиду того, что данная система зафокального типа, используется абсолютная величина высоты при втором отражении ( $|h_2|$ ). Тогда величина коэффициента экранирования будет одинакова.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon.$$

Далее рассчитаем положения плоскостей промежуточного изображения и экранирования, для которых учитывается коэффициент центрального экранирования  $\varepsilon$ . Положение плоскости промежуточного изображения можно определить по формуле:

$$l_i = -\frac{d_1}{h_2 - 1} = \frac{d_1}{\varepsilon + 1}, \tag{1}$$

$$\text{где } \bar{h}_2 = -h_2 \cdot \varepsilon.$$

По соответствующим геометрическим построениям определено выражение для положения плоскости экранирования:

$$l_{sc} = \frac{\bar{h}_1 \cdot d_1}{h_2} = -\varepsilon^2 \cdot d_1 \tag{2}$$

$$\text{где } \Delta l + l_i = l_{sc},$$

$$\Delta_l = \left( -\varepsilon + \frac{1}{\varepsilon + 1} \right) \cdot \varepsilon \cdot d_1. \quad (3)$$

Отметим, в приведенной формуле (3) когда  $\Delta_l = 0$  при следующем дополнительном условии:

$$\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon + 1}, l_i = l_{sc}.$$

Таким образом, согласно формулам (1) и (2), положения плоскостей промежуточного изображения и экранирования зависят от расстояния между поверхностями и коэффициента экранирования.

### Алгоритм расчета построения бленды для защиты плоскости изображения

Рассмотренный зафокальный объектив состоит из двух вогнутых зеркал. Опасным лучом прямой засветки, попадающим на край изображения, будет являться луч, идущий по краю отверстия второго зеркала. Специальная бленда, установленная в центральном отверстии второго зеркала, срежет его и другие возможные лучи постороннего света.

На втором этапе с помощью алгоритма расчета были выбраны расположения бленды и защитного экрана и определены относительные величины соответствующих радиусов:

- 1) для  $l_b > 0$  радиус выходного окна бленды  $R_{b(f)} = 1$ ;
- 2) для  $l_b = 0$  радиус входного окна бленды  $R_{b(i)} = 1 + \Delta_b$ .

Исследуемая система представляет обратную зафокальную систему, для которой паразитные лучи идут между краями центрального отверстия первого и второго зеркал. На рисунке 2 показана

геометрическая схема с блендой, для установки которой заданы необходимые условия:

- 1) для защиты экрана,  $\Delta_b < \bar{h}_2$ ;
- 2) для прямой паразитной засветки,  $\Delta_b > -y'_1$ ;
- 3) для нулевой высоты второго отражения главного луча,  $|h_2| > R_{b(i)} > R_{b(f)} > 0$ ;
- 4) конический корпус;
- 5) условие технологичности:  $f = 1/\alpha_3$ .

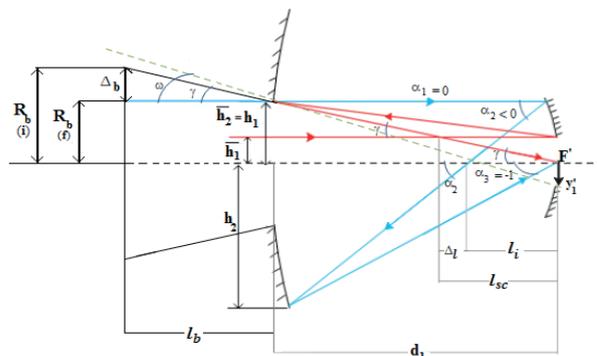


Рисунок 2 – Установка бленды двухзеркального зафокального объектива

Figure 2 – Mounting glare stop in two-mirror extra-focal objective

Размер изображения можно определить по следующей формуле:

$$y'_1 = f \cdot \tan \omega.$$

В результате математических преобразований получено выражение, определяющее положение бленды для исследуемого двухзеркального объектива:

$$l_b = \frac{\Delta_b \cdot (d_1 - l_{sc})}{h_1} = \frac{\Delta_b \cdot d_1 (\varepsilon^2 + 1)}{h_1}.$$

Параметры геометрических конструкций бленды приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

### Конструктивные параметры бленды двухзеркального зафокального типа Design parameters of glare stop in two-mirror extra-focal objective

$l_i = l_{sc}$	$l_b$	$\Delta b$	$y'_1$	$\varepsilon$
61,8 mm	11,08 mm	5 mm	3,49 mm	0,618 (безразмерный) (adimensional)

### Оценка виньетирования

Для оценки коэффициента виньетирования определяем площадь действующего отверстия входного зрачка для наклонного пучка лучей с помощью следующего алгоритма расчета:

- 1) расчет положения и величину изображе-

ния светового отверстия бленды и всех экранов и диафрагм в пространстве предметов по формулам инварианта Аббе и линейного увеличения:

$$\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S'_i} = \frac{2}{r_i}, \quad \frac{S'_i}{S_i} = \beta_i;$$

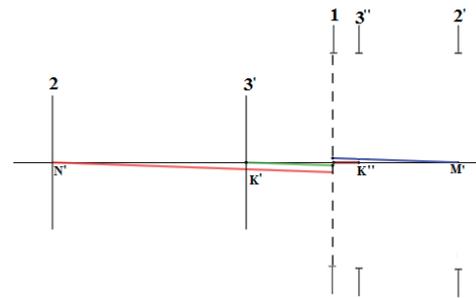
2) построение и проецирование полученных изображений, находящихся в пространстве предметов, в плоскость входного зрачка с центром проекции в заданной точке предмета:

$$O\bar{Y}' = S_i \cdot \tan \omega.$$

На рисунке 3 изображен схематический чертеж расположения этих изображений относительно входного зрачка в исследуемой схеме.

Расчетные величины положений и изображений для всех экранов и диафрагм показаны в таблице 3.

3) вычисление общей площади для всех проекций, которая определяет действующую площадь входного зрачка для заданного внеосевого пучка лучей; диаграмма виньетирования представлена на рисунке 4.



**Рисунок 3** – Схематический чертеж изображений бленды и экранов: 1 – первое зеркало (входной зрачок); 2 – второе зеркало (экран); 3'' – бленда (отверстие); 2' – второе зеркало (отверстие); 3' – бленда (экран)

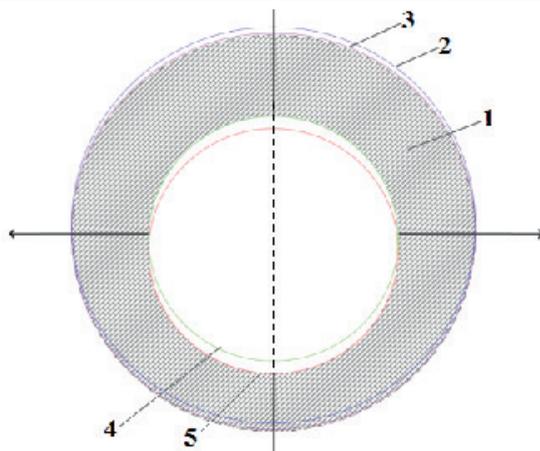
**Figure 3** – Schematic drawing of images of glare stop and screens: 1 – main mirror (entrance pupil); 2 – second mirror (screen); 3'' – glare stop (aperture); 2' – second mirror (aperture); 3' – glare stop (screen)

Таблица 3 / Table 3

#### Величины положения и размеров изображений всех диафрагм и экранов

#### The values of the positions and images sizes of all stops and screens

№ п/п	$Y'$	$OY'$	$S_i$	$S'_i$	$\beta_i$
Второе зеркало (экран) Second mirror (screen)	$N'$	–3,49 mm	–100 mm	–161,8 mm	1,62
Второе зеркало (отверстие) Second mirror (aperture)	$M'$	1,56 mm	44,72 mm	161,8 mm	3,62
Бленда (экран) Glare stop (screen)	$K'$	–1,08 mm	–30,9 mm	61,8 mm	–5,24
Бленда (отверстие) Glare stop (aperture)	$K''$	0,37 mm	9,3 mm	11,08 mm	1,19



**Рисунок 4** – Диаграмма виньетирования для заданного угла  $\omega$ : 1 – первое зеркало (входной зрачок); 2 – второе зеркало (отверстие); 3 – бленда (отверстие); 4 – бленда (экран); 5 – второе зеркало (экран)

**Figure 4** – Vignetting diagram for a given angle  $\omega$ : 1 – main mirror (entrance pupil); 2 – second mirror (aperture); 3 – glare stop (aperture); 4 – glare stop (screen); 5 – second mirror (screen)

Отношение площади  $Q_\omega$  действующего отверстия входного зрачка для наклонного пучка лучей к площади  $Q_0$  входного зрачка является коэффициентом виньетирования [10].

Для исследуемого объектива рассчитанный коэффициент виньетирования  $k_Q = Q_\omega / Q_0$ . Площадь входного зрачка равна  $Q_0 = 4644,59 \text{ мм}^2$  и эффективная площадь зрачка  $Q_\omega = 2637,43 \text{ мм}^2$ , что составляет 56,78 % от реальной площади. Таким образом, коэффициент виньетирования  $k_Q = 0,56$ .

#### Заключение

Проведено усовершенствование методики построения бленды для защиты изображения двухзеркальной системы и получен алгоритм расчета конструкции бленды. Показано, что установка бленды усложняется с увеличением угла поля зрения. Установлена связь коэффициента экранирования с расстоянием между поверхно-

стями зеркал и высотами нулевых лучей. Рассчитаны и построены диаграммы виньетирования двухзеркальной зафокальной системы, определен коэффициент виньетирования.

### Список использованных источников

1. Артюхина, Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем : монография / Н.К. Артюхина. – Минск : БНТУ, 2009. – 309 с.

2. Smith, Warren J. «Stops and Apertures» of Modern optical engineering / Warren J. Smith. – 3rd ed. – New York : McGraw-Hill, 2000. – Chapter 6. – P. 147–148.

3. Якушенко, Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов / Ю.Б. Павлушов, С.А. Родионов, В.П. Солдатов [и др.] ; под ред. Ю.Г. Якушенко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Логос, 2000. – 488 с. : ил.

4. Филиппова, О.В. Оптимизация конструкции светозащитной бленды прибора звездной ориентации / О.В. Филиппова, Р.В. Бессонов, Г.А. Аванесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11. – № 2. – С. 165–174.

5. Robert P. Breault. «Control of stray light» of Handbook of Optics / Robert P. Breault // Fundamentals, techniques, and design. – Vol. 1. – New York : McGraw-Hill, 1995. – Chapter 38.

6. Романов, А.Е. Using hoods with conical diaphragms as part of a topographic apparatus complex / А.Е. Романов, Е.В. Исаева // Journal of Optical Technology. – 2005. – Vol. 72, issue 6. – P. 455–459.

doi: 10.1364/JOT.72.000455

7. Романов, А.Е. Modeling multiple reflections in hoods with conical stops / А.Е. Романов // Journal of Optical Technology. – 2007. – Vol. 74, issue 7. – P. 471–475.

doi: 10.1364/JOT.74.000471

8. Артюхина, Н.К. Двухзеркальный зафокальный светосильный объектив / Н.К. Артюхина, В.А. Марчик, Л.Ф. Самбрано // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Приборостроение». Киев, 2016. № 56. – С. 21–25.

9. Артюхина, Н.К. Принципы построения светозащитных бленд и методика расчета диаграмм виньетирования в четырехзеркальных анастигматах Н.К. Артюхина // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Приборостроение». – Киев, 2010. – Вып. № 39. – С. 34–41.

10. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. – 3-е

изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 448 с.

### References

1. Artyukhina N.K. *Teoriya, metody proektirovaniya i raschet zerkal'nykh sistem* [Theory, methods of design and calculation of mirror systems: monograph]. Minsk, BNTU Publ., 2009, 309 p (in Russian).

2. Smith Warren J. «Stops and Apertures» of Modern optical engineering. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 2000, chapter 6, pp. 147–148.

3. Yakushenkov Yu.G., Pavulyusov Yu.B., Rodionov S.A., Soldatov V.P. *Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov* [Design of Optoelectronic Devices: A Textbook]. 2nd ed., Moscow, Logos Publ., 2000, 488 p (in Russian).

4. Filippova O.V., Bessonov R.V., Avanesov G.A. [Development of effective light-protective baffle construction for star tracker]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], 2014, vol. 11, no. 2, pp. 165–174 (in Russian).

5. Robert P. Breault. «Control of stray light» of Handbook of Optics. *Fundamentals, techniques, and design*, vol. 1., New York, McGraw-Hill Publ., 1995, chapter 38.

6. Romanov A.E., Isaeva E.V. Using hoods with conical diaphragms as part of a topographic apparatus complex. *Journal of Optical Technology*, 2005, vol. 72, issue 6, pp. 455–459. doi: 10.1364/JOT.72.000455

7. Romanov A.E. Modeling multiple reflections in hoods with conical stops. *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, issue 7, pp. 471–475. doi: 10.1364/JOT.74.000471

8. Artyukhina N.K., Marchik V.A. Zambrano L.F. [Two-Mirror High-Aperture Extra-Focal Lens]. *Vestnik NTUU «KPI» Seriya priborostroyeniye* [Herald NTUU «KPI»]. Kiev, 2016. vol. 56, pp. 21–25 (in Russian).

9. Artyukhina N.K. [The designs of glare stops from extraneous light and vignetting diagram principles of four-mirrors anastigmats]. *Vestnik NTUU «KPI» Seriya «Priborostroyeniye»* [Herald NTUU «KPI»]. Kiev, 2010, vol. 39, pp. 34–41 (in Russian).

10. Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.N. *Teoriya opticheskikh sistem* [Theory of Optical Systems]. 3rd ed., Moscow, Mechanical Engineering Press., 1992, 448 p.

УДК 621.396.67

## Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 14.09.2017

Принята к печати 17.11.2017

Измерение диаграмм направленности антенн проводится методами дальней и ближней зоны. Измерения в дальней зоне являются прямыми, однако обладают рядом недостатков. Ближнезональные способы измерения свободны от недостатков измерений в дальней зоне, но требуют для своей реализации сложной и дорогостоящей аппаратуры и оборудования.

Ранее авторами разработана концепция построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне. Концепция предполагает создание универсального измерительного комплекса для исследования различных типов антенных систем с любым типом поверхности измерения (плоскость, цилиндр, сфера) для решения широкого круга прикладных задач. Целью данной работы явилась практическая реализация варианта измерительного комплекса для измерения по плоскости и определение его метрологических (аппаратных и программных) возможностей.

Разработан, создан и практически опробован действующий экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для измерения характеристик антенных систем, реализующий радиоголографический метод измерения по плоскости. Проведена предварительная оценка погрешностей измерения амплитуды и фазы в динамическом диапазоне 45 дБ и сравнение характеристик нескольких типов антенн, измеренных в дальней и ближней зонах. Разработаны алгоритмы, создано программное обеспечение по обработке, хранению и графическому отображению результатов измерения.

**Ключевые слова:** антенная система, диаграмма направленности, ближняя зона, измерительный комплекс.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

---

**Адрес для переписки:**

Гринчук А.П.  
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь  
e-mail: anatbudai@gmail.com

**Для цитирования:**

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громыко А.В.  
Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 4. С. 334–343.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

---

**Address for correspondence:**

Grinchuk A.  
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus  
e-mail: anatbudai@gmail.com

**For citation:**

Buday A., Grinchuk A., Gromyko A.  
[Practical implementation of hardware and software complex for planar measurements of antenna characteristics in the near zone].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 334–343 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

# Practical implementation of hardware and software complex for planar measurements of antenna characteristics in the near zone

**Buday A., Grinchuk A., Gromyko A.**

*A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus*

*Received 14.09.2017*

*Accepted for publication 17.11.2017*

## Abstract

Directional patterns measurement of antennas is carried out by the methods of far and near zone. Measurements in the far zone are straightforward; however they have a number of disadvantages. Near zone measurement methods are free from measurement shortcomings in the far zone, but it requires complex and expensive equipment for its implementation.

Earlier, the authors have developed a concept of hardware and software modular design complex to determine antenna system characteristics as per measurements in the near zone. This concept assumes creation of a universal measuring complex to investigate various types of antenna systems with any type of measurement surface (plane, cylinder, sphere) in order to solve a wide range of applied problems. The purpose of this work lies in practical implementation of a variant of this measuring complex for measurement along the plane and determination of its metrological (hardware and software) capabilities.

A working experimental sample of hardware and software complex for measuring the characteristics of antenna systems that realizes a radio-holographic method for measuring along a plane has been developed, created and practically tested. A preliminary estimation of errors in amplitude and phase measurements in the dynamic range of 45 dB and a comparison of the characteristics of several types of antennas measured in far and near zones have been made. Algorithms have been developed, a software for processing, storing and graphical display of measurement results has been created.

**Keywords:** antenna system, directional pattern, near zone, measuring complex.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

---

### Адрес для переписки:

Гринчук А.П.  
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь  
e-mail: anatbudai@gmail.com

### Для цитирования:

Будай А.Г., Гринчук А.П., Громько А.В.  
Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для  
планарных измерений характеристик антенн в ближней зоне.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 334–343.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

---

### Address for correspondence:

Grinchuk A.  
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,  
Belarusian State University,  
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus  
e-mail: anatbudai@gmail.com

### For citation:

Buday A., Grinchuk A., Gromyko A.  
[Practical implementation of hardware and software complex for planar  
measurements of antenna characteristics in the near zone].  
*Devices and Methods of Measurements.*  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 334–343(in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-334-343

## Введение

Основной характеристикой антенны как излучающего и приемного устройства является диаграмма направленности (ДН), определяющая структуру поля излучения антенны на значительном (по отношению к электрическим размерам излучающей апертуры антенны) расстоянии от антенны – в дальней зоне. Физический смысл понятия дальней зоны состоит в том, что исследуемая антенна находится в поле плоской волны. В зависимости от способа формирования такой плоской волны различают два основных метода измерения ДН: измерения в дальней зоне и измерения в ближней зоне [1–9].

Измерения в дальней зоне являются прямым методом, достаточно просты, не требуют сложной аппаратуры, однако обладают рядом недостатков:

- значительные расстояния между исследуемой и зондовой антенной, что предполагает проведение измерений вне помещений;
- существенное влияние окружающих предметов и подстилающей поверхности;
- зависимость от погодных условий;
- невозможность обеспечения скрытности измерений;
- невозможность измерения пространственной ДН (как правило, измеряют некоторые сечения).

Измерения в ближней зоне свободны от этих недостатков. Методологической основой этих измерений является создание на небольшом расстоянии от исследуемой антенны некоего излучателя, формирующего в раскрыве антенны плоскую волну. Осуществить это возможно двумя путями:

- формирование участка плоского фронта с помощью специальной антенны – коллиматора (коллиматорный метод);
- синтезирование участка плоского фронта за счет последовательного помещения слабонаправленной антенны в узловые точки, расположенные на некоторой поверхности вблизи исследуемой антенны и измерения амплитуды и фазы поля излучения в этих точках. В дальнейшем полученная информация обрабатывается и путем математических расчетов вычисляются требуемые характеристики (радиологический или амплифазометрический метод).

Общие преимущества ближнезонных измерений заключаются в том, что измерения проводятся в помещении на небольших расстояниях.

Для минимизации побочных воздействий и обеспечения скрытности измерений исследуемая антенна и измерительная аппаратура располагаются в безэховых камерах, представляющих собой экранированные помещения, все поверхности которых покрыты радиопоглощающим материалом.

Коллиматорный метод, по сути, аналогичен прямым измерениям в дальней зоне и позволяет измерять основные сечения ДН. Основным недостатком коллиматорного метода является высокая стоимость оборудования, в первую очередь самого коллиматора.

С точки зрения антенных измерений наиболее универсальным является радиологический метод. Методологической основой этих измерений являются прямые измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) поля антенной системы на некоторой поверхности в непосредственной близости от излучающей апертуры. Так как интенсивность поля излучения антенной системы и его структура на различных расстояниях от излучающей апертуры однозначно математически связаны, то по измеренному полю на некотором расстоянии возможно расчетным путем восстановить структуру поля на любом расстоянии от антенны. При этом структура поля на значительном расстоянии от антенны (в дальней зоне) определяет диаграмму направленности, а на малых расстояниях позволяет проанализировать влияние отдельных конструктивных и диаграммообразующих элементов. Таким образом, радиологический метод позволяет получать максимум информации об исследуемой антенне.

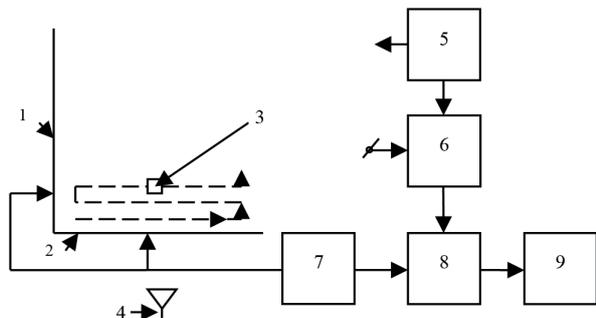
Существующие в настоящее время измерительные комплексы, реализующие радиологический метод измерения, представляют собой сложные и весьма дорогостоящие устройства. В работе [10] авторы предложили концепцию построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне (радиологический метод), одним из преимуществ которого является экономическая доступность комплекса. Концепция предполагала создание универсального измерительного комплекса для исследования различных типов антенных систем с любым типом поверхности измерения (плоскость, цилиндр, сфера) для решения широкого круга прикладных задач.

Целью данной работы являлась практическая реализация варианта измерительного комплекса

для измерения по плоскости и определение его метрологических (аппаратных и программных) возможностей.

### Структура измерительного комплекса

Структурная схема аппаратной части измерительного комплекса представлена на рисунке 1.



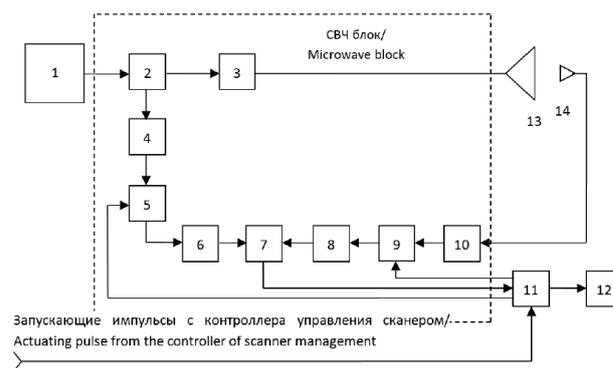
**Рисунок 1** – Структурная схема аппаратной части измерительного комплекса: 1 – устройство сканирования по координате  $Y$ ; 2 – устройство сканирования по координате  $X$ ; 3 – зонд; 4 – исследуемая антенна; 5 – СВЧ генератор; 6 – измерительный приемник; 7 – контроллер управления сканирующими устройствами; 8 – контроллер ввода данных; 9 – компьютер

**Figure 1** – Block diagram of measuring complex hardware: 1 – scanning device in  $Y$  coordinate; 2 – scanning device in  $X$  coordinate; 3 – probe; 4 – antenna under research; 5 – microwave generator; 6 – measuring receiver; 7 – controller for scanning devices management; 8 – data input controller; 9 – computer

Исследуемая антенна неподвижна и устанавливается таким образом, чтобы апертура антенны располагалась в непосредственной близости от плоскости сканирования и параллельно ей. Плоскость сканирования ориентируется таким образом, что ось  $X$  располагается горизонтально, ось  $Y$  – вертикально. Размеры области сканирования выбираются таким образом, чтобы значения амплитуды поля на краю области сканирования были максимально малы. Практика показывает, что эта величина должна быть не менее  $-40$  дБ. Зонд перемещается вдоль двух направляющих по  $X$  и  $Y$  координатам возвратно поступательно, сканируя всю область. Отсчеты значений АФР поля, измеренные приемником, выполняются в дискретных точках, линейные расстояния между которыми в строке (по оси  $X$ ) и по столбцам (по оси  $Y$ ) составляют половину длины волны  $\lambda$ , на которой производится измерение. Процесс измерения построен таким образом, что зонд пробегает всю строку по координате  $X$ , затем

следует перемещение по координате  $Y$  на величину  $\lambda/2$ , затем опять по координате  $X$  в обратном направлении. Для формирования запускающих импульсов для измерительного приемника используются перфорированные координатные линейки. Следует отметить, что исследуемая антенна и измерительный зонд могут работать как в режиме излучения, так и в режиме приема (попарно).

Измерительный приемник состоит из двух основных блоков: СВЧ блока и блока обработки низкочастотного (НЧ) сигнала (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Структурная схема измерительного приемника: 1 – генератор СВЧ; 2 – направленный ответвитель; 3, 4, 6, 8, 10 – вентили; 5 – управляемый фазовращатель  $0-90^\circ$ ; 7 – смеситель; 9 – модулятор; 11 – блок низкочастотной обработки; 12 – компьютер; 13 – исследуемая антенна; 14 – зонд

**Figure 2** – Block diagram of the measuring receiver: 1 – microwave generator; 2 – directional coupler; 3, 4, 6, 8, 10 – valves; 5 – controlled phase shifter  $0-90^\circ$ ; 7 – mixer; 9 – modulator; 11 – low-frequency processing unit; 12 – computer; 13 – antenna under research; 14 – probe

В изготовленном приемнике реализован принцип определения амплитуды и фазы СВЧ сигнала на основании измерения квадратур  $A\sin\varphi$  и  $A\cos\varphi$ , где  $A$  – амплитуда;  $\varphi$  – фаза измеряемого СВЧ сигнала. Измерения квадратур выполняются последовательно во времени, что обеспечивает максимальную идентичность измерительных каналов. Блок НЧ обработки вырабатывает импульсный сигнал прямоугольной формы (меандр) частотой 33 кГц, который подается на модулятор СВЧ блока. Модулятор проходного типа представляет собой щель в волноводе с включенным в нее СВЧ  $pin$ -диодом. Щель с диодом может быть согласована с помощью подстроечных элементов в частотном диапазоне 8,6–9,6 ГГц. Когда на диод не подано напряжение, принятый зондом сигнал проходит через щель далее в тракт. Когда диод

открыт, щель оказывается закороченной, сигнал отражается и гасится вентилем. Таким образом достигается практически 100%-ная амплитудная модуляция. Модулированный СВЧ сигнал с приемного зонда подается на первый вход смесителя, на второй вход которого подается опорный сигнал от СВЧ генератора. В канал опорного сигнала включен управляемый СВЧ фазовращатель, состоящий из циркулятора, *pin*-диодного переключателя и подвижного короткозамыкателя. Переключатель, конструктивно аналогичный описанному выше модулятору, включен на втором выходе циркулятора между ним и подвижным короткозамыкателем. Измерения проводятся за два такта. В первом переключатель закрыт, СВЧ сигнал отражается от плоскости переключателя и подается на третий выход циркулятора с неким значением фазы  $\varphi$ . Во втором такте переключатель открыт, СВЧ сигнал отражается от плоскости короткозамыкателя и подается на третий выход с некоторым фазовым сдвигом. Настройка СВЧ блока заключается в том, чтобы на рабочей частоте установить этот фазовый сдвиг  $90^\circ$ . На выходе смесителя на частоте модуляции в первом такте появляется сигнал, амплитуда которого пропорциональна  $A \sin \varphi$ , а во втором такте соответственно  $A \cos \varphi$ . Блок НЧ обработки формирует управляющие сигналы, обеспечивающие длительность цикла измерения 9 мкс со следующей структурой: 3 мкс – длительность первого такта измерения, 3 мкс – пауза для затухания переходных процессов, 3 мкс – длительность второго такта измерения. Частота циклов измерения задается запускающими импульсами, поступающими на вход блока обработки НЧ сигнала с контроллера управления сканером.

На рисунке 2 приведена схема для случая, когда исследуемая антенна работает на излучение, а зонд – на прием. Для обратного случая точки подключения антенны и зонда надо поменять местами.

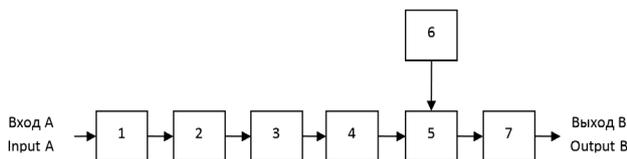
Канал обработки НЧ сигнала с выхода смесителя включает селективный усилитель, настроенный на частоту модуляции, синхронный детектор, обеспечивающий линейное детектирование и выделение знака обрабатываемой в данный момент квадратуры, и 12 разрядный АЦП. Цифровой код измеренной амплитуды обрабатываемой квадратуры совместно с указанием ее знака и управляющими сигналами, обеспечивающими признаки тактов, подаются на контроллер ввода данных в компьютер. Преимуществами описан-

ной реализации измерительного приемника являются простота, доступность комплектующих элементов и невысокая стоимость. К недостаткам можно отнести ограниченный рабочий частотный диапазон, определяемый параметрами модулятора и фазовращателя, а также некоторой трудоемкостью настройки  $90^\circ$ -градусного сдвига на каждой частоте из рабочего диапазона. Однако в случае разработки и тестирования изделий, работающих в конкретном частотном диапазоне, экономическая доступность может иметь решающее значение.

Программное обеспечение измерительного комплекса реализует ввод измеренных данных, решение интегральных уравнений [10] (в виде прямого интегрирования и использования алгоритма быстрого преобразования Фурье), визуализацию результатов в виде двумерных и одномерных графических изображений, хранение измеренных данных и полученных результатов. Измеренные данные и результаты расчетов представляются в виде двумерных массивов размерностью  $N \times M$  (где  $N$  и  $M$  – количества отсчетов по каждой из координат). Использование процедуры стандартного быстрого преобразования Фурье требует размерности массива по каждой из координат, кратной  $2N$ , где  $N$  – размерность массива (количество отсчетов) по каждой координате.

Для определения точностных характеристик измерительного приемника была собрана схема, в которой выход и вход СВЧ блока измерительного приемника соединены через измерительный модуль (вход  $A$  и выход  $B$  соответственно), структурная схема которого приведена на рисунке 3. В качестве аттенюаторов использовались аттестованные поляризационные аттенюаторы типа Д5-5, а в качестве фазовращателя – циркулятор с подвижным короткозамыкателем. В качестве генератора использовался генератор Г4-111. Измерения проводились на частоте 9,4 ГГц в нескольких точках диапазона измерения фазы: две квадратуры близки по величине и одна из квадратур существенно больше другой (знаки квадратур различны) в динамическом диапазоне изменения амплитуд 0–50 дБ через 5 дБ. В каждой точке записывался файл из 20 отсчетов, и по ним рассчитывались средние значения амплитуды и фазы, а также их дисперсии. Измерения показали, что максимальные погрешности наблюдаются вблизи перехода одной из квадратур через нуль. Максимальные отклонения по затуханию в диапазоне от 0 до –40 дБ составляет 0,8 дБ, увеличиваясь

до 1,6 дБ в диапазоне до –50 дБ. При этом среднеквадратичное отклонение по амплитуде не превышает единицы младшего разряда АЦП, а по фазе – менее  $1^\circ$ . За два часа уход значения фазы составил не более  $5^\circ$ . Таким образом, изготовленный измерительный приемник на конкретной частоте имеет удовлетворительные точностные характеристики.



**Рисунок 3** – Структурная схема измерительного модуля: 1, 4, 7 – вентили; 2, 3 – аттенюаторы; 5 – циркулятор; 6 – подвижный короткозамыкатель

**Figure 3** – Block diagram of the measuring module: 1, 4, 7 – valves; 2, 3 – attenuators; 5 – circulator; 6 – movable short-circuit

### Результаты применения комплекса для измерения характеристик антенн

С использованием экспериментального образца измерительного комплекса проведены измерения АФР и восстановления пространственных диаграмм направленности (ДН) измерительной антенны П6-23 (рисунок 4), а также апертурных решеток различных конструкций: на основе печатных монополей, вибраторов и волноводно-щелевых антенн, работающих в том числе и в моноимпульсном режиме. Антенна П6-23 сфотографирована на фоне двумерного сканирующего устройства, установленного в безэховой камере. Направляющие для сканирования по координатам  $X$  и  $Y$  укрыты радиопоглощающим материалом.



**Рисунок 4** – Измерительная антенна П6-23

**Figure 4** – Antenna П6-23

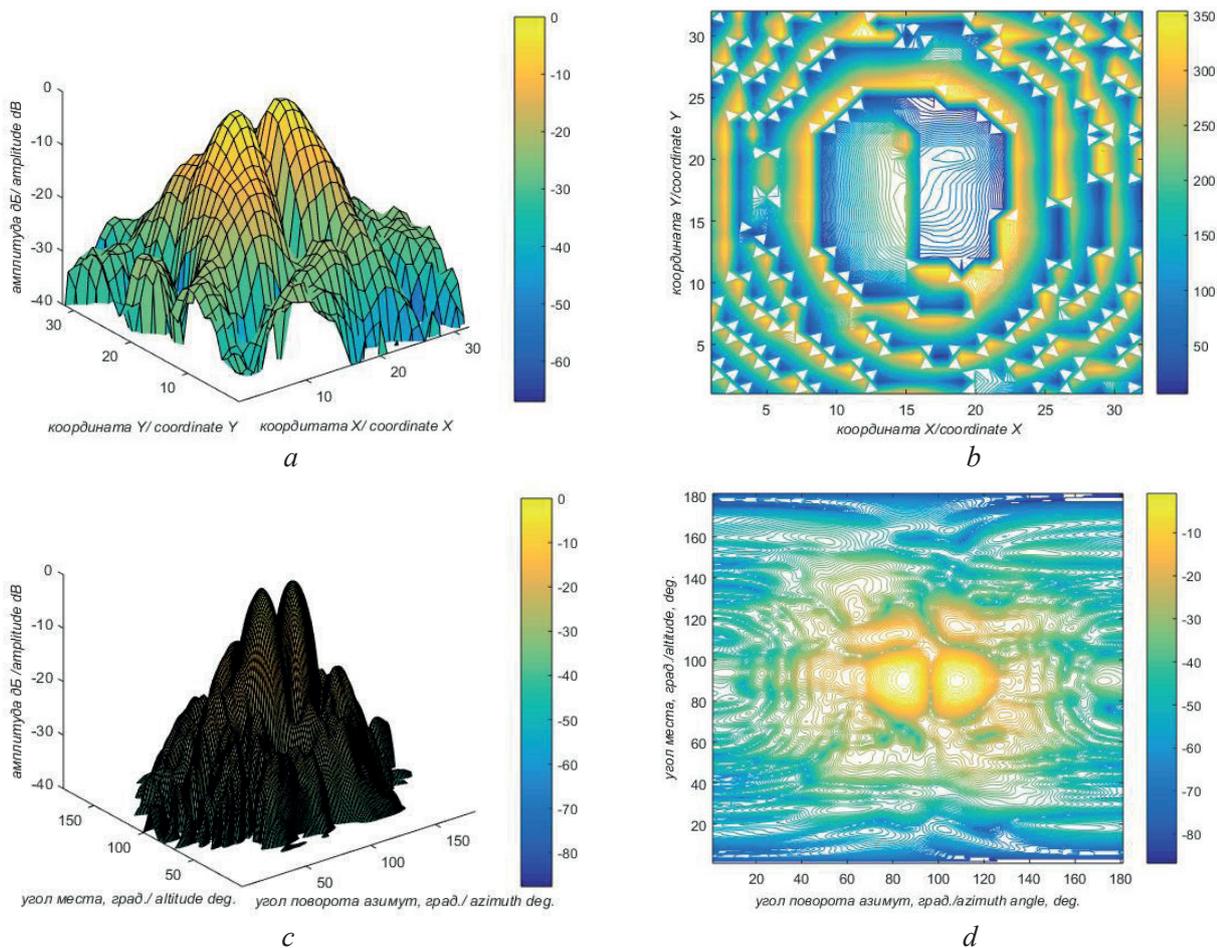
Измерения характеристик всех моноимпульсных антенн проводилось в режиме работы по суммарному и разностному каналу.

В качестве примера графического представления измеренных и рассчитанных характеристик на рисунке 5 приведены объемные изображения измеренного амплитудного распределения поля щелевой антенной решетки (разностный канал) и рассчитанной ДН. Картографическое представление результатов дает хорошую наглядную картину пространственного распределения структуры полей излучения как в ближней, так и в дальней зоне. В частности, фазовое распределение показывает, что для формирования разностного канала необходимо, чтобы соответствующие половины решетки возбуждались в противофазе.

### Влияние параметров зонда. Сравнение измерений в дальней и ближней зонах

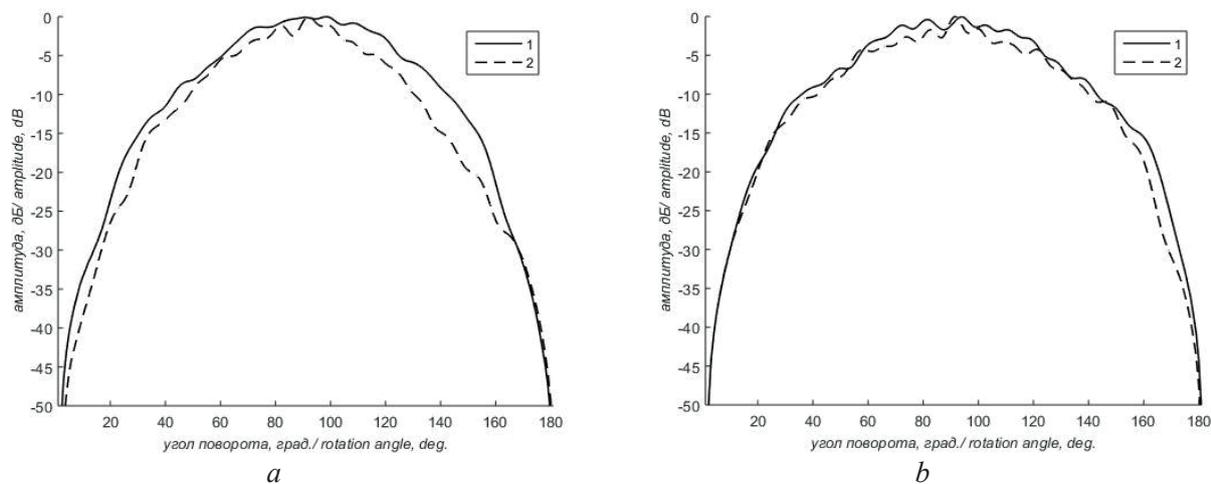
Теоретически влияние зонда можно рассматривать с точки зрения пространственной фильтрации. Если представить ДН исследуемой антенны в виде спектра пространственных гармоник, то зонд, имея собственную диаграмму направленности, является фильтром пространственных гармоник, подавляя те из них, в направлении которых его собственная ДН спадает по сравнению с максимумом. Практически реализовать абсолютно ненаправленный (в переднем полупространстве) зонд в полосе частот достаточно сложно. Кроме того, применение подобного зонда существенно повысит влияние различных помеховых сигналов. Поэтому проще учесть влияние зонда вычислительным путем, зная его ДН.

Для практического определения влияния зонда на результаты ближнезонных измерений проведена серия измерений характеристик излучения различных антенн с использованием в качестве зонда открытого конца волновода и печатного вибратора с рефлектором. Открытый конец волновода сечением  $23 \times 10$  мм доработан таким образом, чтобы улучшить его согласование (получен коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне 8–10 ГГц на уровне 1,2–1,4). Вибратор имеет более узкую полосу частот 8,5–10 ГГц по уровню КСВ 1,5. На рабочей частоте (9,4 ГГц) КСВ равен 1,2. На рисунке 6 приведены главные сечения диаграмм направленности открытого конца волновода и вибратора в  $H$  и  $E$  плоскостях, рассчитанные по результатам измерения их АФР на созданном комплексе.



**Рисунок 5** – Примеры графического представления измеренных и рассчитанных результатов для щелевой антенной решетки (разностный канал): *a* – объемные изображения измеренного амплитудного распределения; *b* – картографическое изображение измеренного фазового распределения; *c* – объемное и *d* – картографическое изображение рассчитанной диаграммы направленности

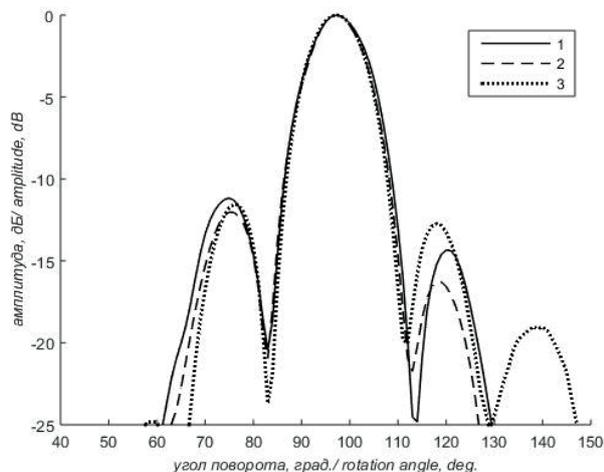
**Figure 5** – Examples of graphical representation of measured and calculated results for slotted antenna array (difference channel): *a* – volumetric images of the measured amplitude distribution; *b* – cartographic image of the measured phase distribution; *c* – volumetric and *d* – cartographic image of the calculated direction pattern



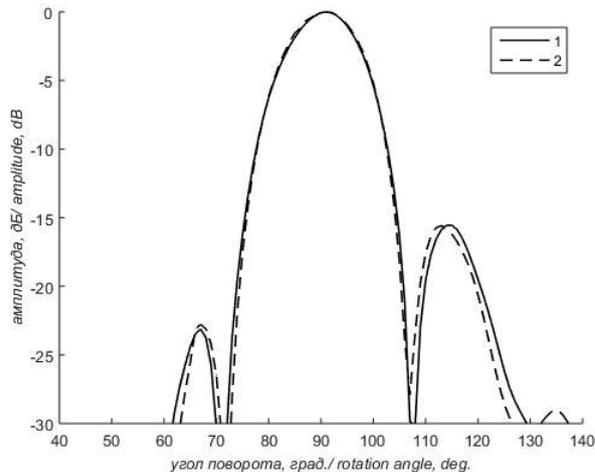
**Рисунок 6** – Главные сечения диаграмм направленности вибратора (1) и открытого конца волновода (2) в *H* (*a*) и *E* (*b*) плоскостях

**Figure 6** – Main cross-sections of direction patterns of (1) vibrator and the open end of the waveguide (2) in *H* (*a*) and *E* (*b*) planes

Как и предполагалось, в  $H$  плоскости ДН вибратора несколько шире аналогичной характеристики открытого конца волновода, в  $E$  плоскости различия значительно меньше.



*a*



*b*

**Рисунок 7** – Главные сечения диаграммы направленности щелевой решетки в  $H$  (*a*) и  $E$  (*b*) плоскости для суммарного канала, рассчитанные по результатам ближнезонных измерений, выполненных с использованием рассмотренных зондов: 1 – вибратора; 2 – открытого конца волновода

**Figure 7** – Main cross-sections of direction patterns of the slot array in  $H$  (*a*) and  $E$  (*b*) planes for the total channel, calculated as per the results of near-gap measurements made using the probes: 1 – vibrator; 2 – open end of the waveguide

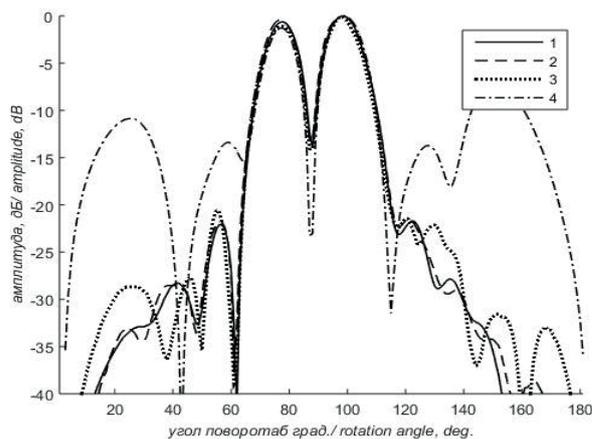
Сравнение полученных результатов показывает, что практически влияние зонда выражается в уменьшении уровня ДН исследуемой антенны во всех угловых направлениях, отличных от нормального, причем степень уменьшения тем выше, чем уже ДН зонда. Поэтому влияние зонда на ДН антенны в  $H$  плоскости более выражено, чем в  $E$  плоскости. На рисунке 7*a* представлено также сечение ДН антенны, измеренное в дальней зоне (кривая 3). Совпадение с ближнезонными измерениями достаточно хорошее, особенно с измерениями, выполненными с вибратором в качестве зонда. Аналогичные результаты получены и для разностного канала.

В целом влияние зонда существенно сказывается вне главного лепестка ДН исследуемой антенны и может учитываться при выполнении прецизионных измерений. Для этого в программном обеспечении имеется программа, перемножающая рассчитанную ДН на соответствующий множитель.

### Влияние величины дискрета (расстояния между выборками)

Теоретически определено [3], что величина дискрета (расстояние между выборками) при из-

мерении АФР поля на плоскости должна быть не более  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина волны, на которой проводятся измерения. Для определения степени влия-



**Рисунок 8** – Главные сечения диаграмм направленности (разностный канал), восстановленных по результатам измерения амплитудно-фазового распределения на плоскости с различным дискретом: 1 –  $0,22 \lambda$ ; 2 –  $0,47 \lambda$ ; 3 –  $0,63 \lambda$ ; 4 –  $0,94 \lambda$

**Figure 8** – Main cross-sections of direction patterns (difference channel), reconstructed from the results of measuring the amplitude-phase distribution on a plane with different discrete values: 1 –  $0,22 \lambda$ ; 2 –  $0,47 \lambda$ ; 3 –  $0,63 \lambda$ ; 4 –  $0,94 \lambda$

ния величины дискрета на точность восстановления ДН была проведена серия измерений АФР одной и той же антенны при различных значениях дискрета. Результаты эксперимента приведены на рисунке 8.

Как и следовало ожидать, для величины дискрета  $\leq \lambda/2$  восстановленные значения ДН совпадают с хорошей точностью. Для величины дискрета больше  $\lambda/2$  и меньше  $3/4\lambda$  с приемлемой точностью восстанавливается область главного лепестка. При приближении дискрета к величине длины волны область совпадения существенно уменьшается, значительно растут боковые лепестки. Таким образом, с целью уменьшения времени измерения и обработки (для проведения экспресс-анализа, не требующего высокой точности восстановления) можно предложить проводить измерения при увеличенном дискрете. Естественно, практическое применение такого подхода даст существенный выигрыш лишь в случае значительных размеров поля сканирования и объемов обрабатываемых массивов.

## Заключение

Разработан, создан и опробован действующий экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса для измерения характеристик антенных систем, реализующий радиоголографический метод измерения по плоскости.

Проведены предварительная оценка погрешностей измерения амплитуды и фазы в динамическом диапазоне 45 дБ и сравнение характеристик нескольких типов антенн, измеренных в дальней и ближней зонах. Получено совпадение результатов в области главного лепестка диаграммы направленности на уровне единиц децибел.

Разработаны алгоритмы, создано программное обеспечение по обработке, хранению и графическому отображению результатов измерения.

Реализованный экспериментальный образец комплекса уже в настоящее время может использоваться при разработке и отладке новых антенных систем.

Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Электроника и фотоника 2.2.02» «Разработка и создание компактного полигона для измерения амплитудно-фазовых распределений и анализа характеристик излучения приемо-передающих модулей в сантиметровом диапазоне волн».

## Список используемых источников

1. Parini, C. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements / C. Parini, S. Gregson, J. McCormik, D. Janse van Rensburg ; The Institution of Engineering & Technology. – London, 2015. – 784 p.

2. Gregson, S. Principles of planar–near–field antenna measurements / S. Gregson, J. McCormik, C. Parini // Electromagnetic waves series. – Vol. 53. The Institution of Engineering & Technology. – London, 2007. – С. 95–103.

3. Курочкин, А.П. Теория и техника антенных измерений / А.П. Курочкин // Антенны. – 2009. – № 7. – С. 39–45.

4. Виноградов, А.Д. Методика антенных измерений, их современное применение и автоматизация / А.Д. Виноградов // Антенны. – 2010. – № 5. – С. 15–21.

5. Васендин, С.В. Исследование антенн и характеристик рассеяния радиолокационных объектов по планарным измерениям в ближней зоне / С.В. Васендин, А.В. Кирпанев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 2. – С. 63–68.

6. Орехов, Ю.И. Автоматизированный комплекс для измерения амплитудно-фазовых распределений диэлектрических излучателей в ближней зоне / Ю.И. Орехов [и др.] // Антенны. – 2010. – № 7. – С. 38–43.

7. Малай, И.М. Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны / И.М. Малай, М.С. Шкуркин // Антенны. – 2014. – № 12. – С. 50–55.

8. Бойко, С.Н. Исследование погрешностей измерения диаграмм направленности антенн в условиях ограниченного пространства / С.Н. Бойко [и др.] // Антенны. – 2014. – № 10. – С. 60–66.

9. Варенцов, Е.Л. Методика экспериментального исследования характеристик антенных систем в дальней зоне с повышенной точностью / Е.Л. Варенцов, А.В. Кашин // Антенны. – 2016. – № 1. – С. 96–108.

10. Будай, А.Г. Разработка концепции построения аппаратно-программного комплекса модульной конструкции для определения характеристик антенных систем по измерениям в ближней зоне / А.Г. Будай, А.П. Гринчук, А.В. Громыко // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 2. – С. 151–159.

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-151-159

## References

1. Parini C., Gregson S., McCormik J., Janse van Rensburg D. Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements C. Parini ; The Institution of Engineering & Technology. London, 2015, 784 p.
2. Gregson S., McCormik J., Parini C. Principles of planar–near–field antenna measurements. *Electromagnetic waves series*, vol. 53, The Institution of Engineering & Technology, London, 2007, pp. 95–103.
3. Kurochkin A. [Theory and technology of antenna measurement]. *Antennas*, 2009, no. 7, pp. 39–45 (in Russian).
4. Vinogradov A. [Methods of antenna measurements, their modern application and automatization]. *Antennas*, 2010, no. 5, pp. 15–21 (in Russian).
5. Vasendin S., Kirpanev A. [Investigation of antennas and characteristics of radar objects dispersion as per planar measurements in the near zone]. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2013, no. 2, pp. 63–68 (in Russian).
6. Orehov J., Makarychev N., Gainulina E., Tihonov A., Kravtsov D. [Automated complex for amplitude-phase distributions measuring of dielectric radiators in the near zone]. *Antennas*, 2010, no. 7, pp. 38–43 (in Russian).
7. Malai I., Shkurkin M. [Application of statistical test method for evaluation of metrological characteristics of antenna automated measuring systems in the near zone]. *Antennas*, 2014, no. 12, 50–55 (in Russian).
8. Boiko S., Kosyakin S., Koshevoy D., Kuharenko A., Yaskin J. [Investigation of measuring inaccuracy of direction patterns in conditions of constraint environment]. *Antennas*, 2014, no. 10, pp. 60–66 (in Russian).
9. Varentsov E., Kashin A. [Method of experimental investigation of characteristics of antenna systems in the far zone with increased accuracy]. *Antennas*, 2016, no. 1, pp. 96–108 (in Russian).
10. Budai A., Grinchuk A., Gromyko A. [Development concept of hardware and software modular design complex to determine antenna system characteristics as per measurements in the near zone]. *Devices and Methods of measurements*, 2017, no. 2, pp. 151–159 (in Russian).  
**doi:** 10.21122/2220-9506-2017-8-2-151-159

УДК 620.191.4

## Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии

Пилипенко В.А.<sup>1</sup>, Солодуха В.А.<sup>1</sup>, Филипена В.А.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>2</sup>, Гусев О.К.<sup>2</sup>,  
Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>2</sup>, Тявловский А.К.<sup>2</sup>, Тявловский К.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 12.10.2017

Принята к печати 28.11.2017

Анализ микронеоднородностей в системе кремний-диоксид кремния становится наиболее актуальным в связи с переходом микроэлектронной промышленности к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика. Целью исследования являлось развитие методов неразрушающего контроля полупроводниковых пластин на основе определения электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния и их пространственного распределения по поверхности пластины бесконтактными методами зондовой электрометрии.

Характеризация границы раздела кремний-диоксид кремния осуществлялась методами анализа вольт-фарадных характеристик и методом сканирующего зонда Кельвина. Исследования выполнялись на материале пластин кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации <100> диаметром 100 мм.

Данные исследования показали, что после проведения быстрой термической обработки наблюдается равномерное распределение поверхностного потенциала по площади пластины. При этом имеет место значительное повышение электрического поверхностного потенциала на границе раздела кремний-диоксид кремния. Повышение регистрируемых значений поверхностного потенциала коррелирует с уменьшением плотности заряда на границе раздела кремний-диоксид кремния. Также изменение поверхностного потенциала по площади пластины после предварительной быстрой термообработки позволяет говорить об изменении структуры поверхностного слоя в полупроводниковой структуре.

Результаты характеризации с использованием методов зондовой электрометрии качественно отражают изменение плотности заряда на границе раздела кремний-диоксид кремния в процессе технологической обработки полупроводниковых пластин. Неоднородности распределения поверхностного потенциала наглядно отражают неоднородности распределения толщины нарушенного в процессе окисления слоя по поверхности пластины и позволяют выявить места локализации дефектов, связанных с нарушением структуры полупроводника у границы раздела кремний-диоксид кремния.

**Ключевые слова:** структура кремний-диоксид кремния, термообработка, зонд Кельвина, вольт-фарадная характеристика, заряд на границе раздела.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

---

**Адрес для переписки:**

Тявловский А.К.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

**Address for correspondence:**

Tyavlovsky Andrey  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

---

**Для цитирования:**

Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Филипена В.А., Воробей Р.И.,  
Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И.,  
Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

Характеризация электрофизических свойств границы раздела  
кремний-диоксид кремния с использованием методов  
зондовой электрометрии.

Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 344–356.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

---

**For citation:**

Pilipenko V.A., Saladukha V.A., Filipenya V.A., Vorobey R.I.,  
Gusev O.K., Zharin A.L., Pansialeyeu K.V., Svistun A.I.,  
Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

[Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon  
dioxide interface using probe electrometry methods].

Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 344–356 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

# Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods

Pilipenko V.A.<sup>1</sup>, Saladukha V.A.<sup>1</sup>, Filipenya V.A.<sup>1</sup>, Vorobey R.I.<sup>2</sup>, Gusev O.K.<sup>2</sup>, Zharin A.L.<sup>1</sup>, Pantsialeyeu K.V.<sup>2</sup>, Svistun A.I.<sup>2</sup>, Tyavlovsky A.K.<sup>2</sup>, Tyavlovsky K.L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Integral» Joint Stock Company,  
Kazintsa Str., 121 A, Minsk 220108, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 12.10.2017

Accepted for publication 28.11.2017

## Abstract

Introduction of submicron design standards into microelectronic industry and a decrease of the gate dielectric thickness raise the importance of the analysis of microinhomogeneities in the silicon-silicon dioxide system. However, there is very little to no information on practical implementation of probe electrometry methods, and particularly scanning Kelvin probe method, in the interoperational control of real semiconductor manufacturing process. The purpose of the study was the development of methods for nondestructive testing of semiconductor wafers based on the determination of electrophysical properties of the silicon-silicon dioxide interface and their spatial distribution over wafer's surface using non-contact probe electrometry methods.

Traditional C-V curve analysis and scanning Kelvin probe method were used to characterize silicon-silicon dioxide interface. The samples under testing were silicon wafers of KEF 4.5 and KDB 12 type (orientation <100>, diameter 100 mm).

Probe electrometry results revealed uniform spatial distribution of wafer's surface potential after its preliminary rapid thermal treatment. Silicon-silicon dioxide electric potential values were also higher after treatment than before it. This potential growth correlates with the drop in interface charge density. At the same time local changes in surface potential indicate changes in surface layer structure.

Probe electrometry results qualitatively reflect changes of interface charge density in silicon-silicon dioxide structure during its technological treatment. Inhomogeneities of surface potential distribution reflect inhomogeneity of damaged layer thickness and can be used as a means for localization of interface treatment defects.

**Keywords:** silicon-silicon dioxide structure, thermal treatment, Kelvin probe, C-V curve, interface charge.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

---

### Адрес для переписки:

Тявловский А.К.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

### Address for correspondence:

Tyavlovsky Andrey  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

---

### Для цитирования:

Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Филипья В.А., Воробей Р.И.,  
Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И.,  
Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 344–356.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

---

### For citation:

Pilipenko V.A., Saladukha V.A., Filipenya V.A., Vorobey R.I.,  
Gusev O.K., Zharin A.L., Pantsialeyeu K.V., Svistun A.I.,  
Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

[Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods].

*Devices and Methods of Measurements.*

2017, vol. 8, no. 4, pp. 344–356 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

## Введение

Система структурных слоев Si-SiO<sub>2</sub> является ключевой в конструкции кремниевых интегральных схем. Анализ микронеоднородностей в данной системе становится наиболее актуальным в связи с переходом к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика. При проектных нормах 0,35 мкм требуемая толщина подзатворного диэлектрика уменьшается до 5,0 нм. Так как тонкий слой диэлектрика формируется термическим окислением из поверхности кремния, то дефекты поверхностного слоя кремния формируют дефекты и в структуре диэлектрика. Таким образом, разброс параметров приборных структур во многом определяется дефектами в системе Si-SiO<sub>2</sub>.

Недостатки традиционных методов и средств контроля структурных слоев Si-SiO<sub>2</sub>, основанных на исследовании их вольтфарадных характеристик, определяются необходимостью создания в процессе измерений непосредственного электрического контакта с поверхностью образца, что изменяет ее состояние и может привести к повреждению структуры [1]. В связи с этим в последнее время в мире уделяется большое внимание развитию бесконтактных методов характеристики полупроводниковых структур, в первую очередь основанных на использовании метода сканирующего зонда Кельвина. Одним из преимуществ использования сканирующего зонда является возможность представления результатов характеристики в виде наглядных цветных карт распределения контролируемого параметра. Определение конкретных физических параметров полупроводниковой структуры при этом не обеспечивается [2]. Для количественного определения таких характеристик полупроводниковых структур, как время жизни неравновесных носителей заряда, подвижность носителей заряда в слое инверсии, плотность заряда на ловушках на границе раздела кремний-диэлектрик, эквивалентная толщина диэлектрика, концентрация примеси тяжелых металлов (в частности, железа) в поверхностных слоях полупроводника, разными авторами предлагалось дополнение методов зондовой электротометрии и, в частности, метода зонда Кельвина, дополнительными воздействиями на исследуемую полупроводниковую структуру в виде осаждения заряда в коронном разряде, освещения поверхности, нагрева [2–6]. Указанные воздействия (в первую очередь, воздействие

коронным разрядом) в большинстве случаев несовместимы с режимом сканирования либо же существенно увеличивают время единичного измерения, что лишает метод зонда Кельвина важного преимущества – возможности получения карт распределения контролируемого параметра. Проблема удаления сформированного дополнительными воздействиями заряда на поверхности полупроводниковой структуры к настоящему времени также удовлетворительно не решена [7]. Вследствие этого в научной литературе отсутствуют данные о практическом применении методов зондовой электротометрии и, в частности метода сканирующего зонда Кельвина, в межоперационном контроле полупроводниковых структур в рамках реального производства.

Целью настоящего исследования являлось развитие методов неразрушающего контроля полупроводниковых пластин на основе определения электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния и их пространственного распределения по поверхности пластины бесконтактными методами зондовой электротометрии. В число основных задач исследования входило сопоставление результатов характеристики полупроводниковых структур традиционными методами и методами зондовой электротометрии для определения применимости последних в межоперационном контроле технологических процессов производства изделий микроэлектроники. В качестве объекта исследования использовались кремниевые пластины в процессе формирования двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением.

## Методика исследований

В основу характеристики границы раздела кремний-двуокись кремния методами зондовой электротометрии положен метод сканирующего зонда Кельвина [8]. Принцип действия зонда заключается в регистрации контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностью чувствительного элемента, играющего роль эталонной обкладки динамического измерительного конденсатора, и локальным участком поверхности исследуемого образца. Величина КРП определяется разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) обкладок динамического конденсатора в соответствии с выражением:

$$U_{CPD} = \frac{\Phi_P - \Phi_S}{e}, \quad (1)$$

где  $\varphi_p$  – РВЭ поверхности чувствительного элемента;  $\varphi_s$  – РВЭ исследуемого участка поверхности образца;  $e$  – элементарный заряд (заряд электрона).

В процессе сканирования величина  $\varphi_p$  эталонной обкладки остается неизменной. Отсюда следует, что пространственное распределение КРП (поверхностного потенциала) по поверхности полупроводниковой пластины отражает пространственное распределение РВЭ, взятой с обратным знаком (большим значениям РВЭ соответствуют меньшие значения КРП). В настоящем исследовании используется представление результатов сканирования в виде двумерной карты распределения поверхностного потенциала (КРП) с отображением значений последнего условными индексными цветами. Регистрация пространственного распределения поверхностного потенциала осуществлялась с помощью измерительной установки бесконтактной характеристики полупроводниковых структур СКАН-2013.

РВЭ является комплексной характеристикой поверхности, зависящей от ее химического состава, кристаллической структуры, наличия и знака механических напряжений и др. [8–11]. Вследствие этого анализ пространственного распределения КРП может применяться для выявления дефектов полупроводниковой структуры, таких как дислокации, поверхностные загрязнения, неравномерность толщины либо несплошность окисла и др. [8]. При наличии на поверхности пластины диэлектрического слоя двуокиси кремния, как это имеет место в настоящем исследовании, значение КРП в значительной степени определяется встроенным зарядом в диэлектрике и на границе раздела кремний-двуокись кремния. Плотность заряда может использоваться как характеристика дефектности границы раздела кремний-двуокись кремния [12].

Теория взаимодействия электрического заряда в зазоре динамического конденсатора с его обкладками подробно рассмотрена в работе [13]. Заряд с ненулевой плотностью  $Q$  наводит на обкладках заряды с плотностями  $q_1$  и  $q_2$  (рисунок 1). Согласно закону Гаусса,

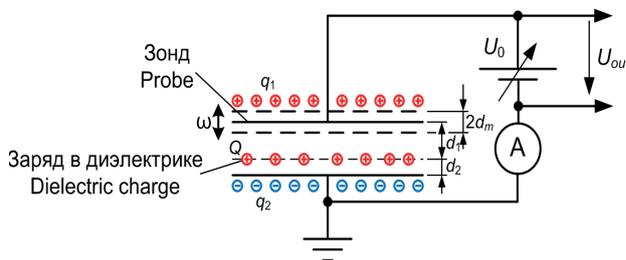
$$Q = q_1 + q_2. \quad (2)$$

Статический заряд не создает дополнительной разности потенциалов  $U_{12}$  между обкладками:

$$U_{12} = U_1 + U_2 = 0, \quad (3)$$

что обеспечивается равенством нулю суперпозиции электрических полей в зазорах  $d_1$  и  $d_2$ :

$$E_1 d_1 + E_2 d_2 = 0. \quad (4)$$



**Рисунок 1** – Модель взаимодействия заряда в диэлектрике с чувствительным элементом сканирующего зонда Кельвина (динамического конденсатора)

**Figure 1** – Model of dielectric charge and Kelvin probe (dynamic capacitor) interaction

Максимальная разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина обеспечивается при условии, что зазор зонд-образец составляет величину, существенно меньшую поперечных размеров чувствительного элемента [14]. Это позволяет в рамках настоящего физического моделирования рассматривать систему «зонд – дефектная поверхность» диэлектрика как плоскопараллельный конденсатор. Для плоскопараллельного конденсатора плотность заряда и напряженность электрического поля связаны соотношениями:

$$E_1 = \frac{q_1}{\varepsilon_0}, \quad E = \frac{q_2}{\varepsilon_0}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Поскольку верхняя обкладка динамического конденсатора (чувствительный элемент) является вибрирующей, зазор  $d_1$  изменяется во времени по закону:

$$d_1(t) = d_{10} + d_m \sin \omega t. \quad (6)$$

Модуляция зазора  $d_1(t)$  приводит к периодическому изменению распределения электрических полей  $E_1$  и  $E_2$ . Поскольку заряд  $Q$  фиксирован по величине и пространственному положению, изменение напряженности электрических полей может происходить только вследствие перераспределения зарядов  $q_1$  и  $q_2$  между обкладками динамического конденсатора посредством внешней электрической цепи, что означает возникновение ненулевого переменного тока  $i_Q(t)$  в этой цепи. Круговая частота тока  $i_Q(t)$  составляет  $\omega$ . Значе-

ние данного тока можно определить как производную от заряда  $q_1$  по времени на основе выражений (2)–(6):

$$i_Q(t) = \frac{dq_1}{dt} = \frac{d_2 Q d_m \omega \cos \omega t}{(d_{10} + d_m \sin \omega t + d_2)^2}. \quad (7)$$

Регулируемый источник ЭДС  $U_0$  во внешней цепи динамического конденсатора создает компенсационный ток  $i_B(t)$ , равный:

$$i_B(t) = \frac{dC}{dt} U_0 = \frac{\varepsilon d_m \omega \cos \omega t}{(d_{10} + d_m \sin \omega t + d_2)^2} U_0. \quad (8)$$

При реализации нулевого компенсационного метода измерений имеет место равенство измерительного и компенсационного токов  $i_Q(t) = i_B(t)$ . Тогда из (7) и (8):

$$U_{out} = U_0 = \frac{Q}{\varepsilon_0} d_2. \quad (9)$$

Таким образом, выходной сигнал сканирующего зонда Кельвина при контроле дефектов диэлектрического слоя представляет собой постоянное напряжение, величина которого прямо пропорциональна плотности заряда в диэлектрике.

Особенный интерес в свете сказанного представляет возможность неразрушающего выявления и локализации дефектов, вносимых ключевыми операциями технологической обработки: окисления и подготовки пластин перед окислением, для чего в настоящем исследовании выполнено сопоставление карт распределения поверхностного потенциала для одних и тех же полупроводниковых пластин до и после проведения технологических операций.

## Результаты исследования и их обсуждение

Исследования выполнялись на материале пластин кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации <100> диаметром 100 мм. Перед формированием подзатворного диэлектрика толщиной 42,5 нм путем пирогенного окисления при температуре 850 °С в течение 40 мин проводилась химическая обработка пластин в КАРО, ПАР5. Часть пластин перед этим проходила быструю термообработку. Быстрая термообработка нерабочей стороны пластины проводилась некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев до температуры 1100 °С в естественных атмосферных условиях. После операций технологической обработки с помощью измерительной системы бесконтактной характеристики полупроводниковых структур СКАН-2013 выполнялись исследования распределения КРП по всей площади рабочей поверхности указанных пластин. Дополнительно традиционными методами [15, 16] на основе анализа вольт-фарадных характеристик определялись напряжения плоских зон и плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, а также значения пробивных напряжений и токов утечки МДП-структур.

Исследование вольт-фарадных характеристик оксидных пленок на пластинах, прошедших быструю термообработку, показывает значительное улучшение их параметров. Наблюдается уменьшение как напряжения плоских зон, так и плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния (таблица 1).

Анализ хода этих характеристик показывает (рисунок 2, 3), что проведение быстрой тер-

Таблица 1 / Table / 1

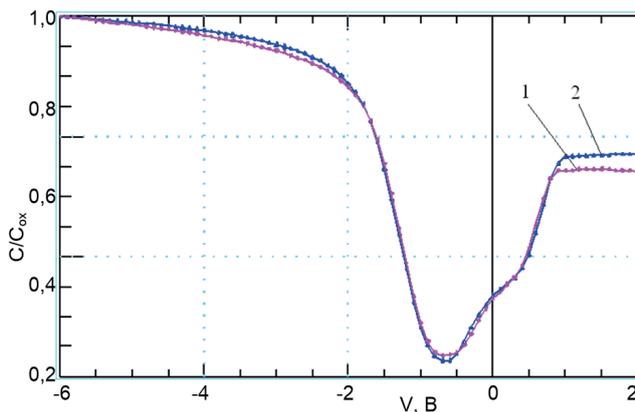
**Параметры границы раздела кремний-двуокись кремния, выращенной на кремнии без и с предварительной быстрой термообработкой**  
**Properties of silicon-silicon dioxide interface for oxide layers grown after preliminary rapid thermal treatment and without preliminary treatment**

Параметры двуокиси кремния Silicon dioxide properties	Тип пластины Wafer type			
	КЭФ 4,5 KEF 4,5		КЭФ 4,5 KEF 4,5	
	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated
Толщина пленки, нм Layer thickness, nm	48,1	48,1	48,4	48,5
Напряжение плоских зон, В Flat zones voltage, V	-0,331	-0,324	-1,837	-1,773
Плотность заряда, см <sup>-2</sup> Charge density, cm <sup>-2</sup>	5,26 · 10 <sup>10</sup>	3,41 · 10 <sup>10</sup>	3,80 · 10 <sup>11</sup>	3,52 · 10 <sup>11</sup>

мической обработки перед окислением приводит к уменьшению заряда на границе раздела. Однако на поверхности окисленной пластины по-прежнему присутствует сильный инверсионный слой, обусловленный наличием положительного заряда в окисле [17, 18]. Его наличие приводит на структуре с *p*-типом кремния к существенному подъему правой ветви вольт-фарадной характеристики с минимального значения 0,4–0,45 отн.ед. до значений по вертикальной оси 0,72–0,78 отн.ед. Наличие перегибов в области подъема свидетельствует о значительной плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела. Скачкообразное увеличение емкости для кремния *p*-типа проводимости в области перехода от обеднения к инверсии при определенном пороговом напряжении может быть связано с наличием положительного заряда в окисле и формированием инверсного слоя как под контактом, так и вблизи за его пределами. В нашем случае это, по-видимому, обусловлено положительным

зарядом, сформированным за счет быстрых поверхностных состояний, связанных с наличием оборванных связей кремния, на границе раздела  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  и присутствием на ней, а также в объеме двуокиси кремния, гидроксильных групп и водорода, образованию которых способствует метод ее получения при низких температурах.

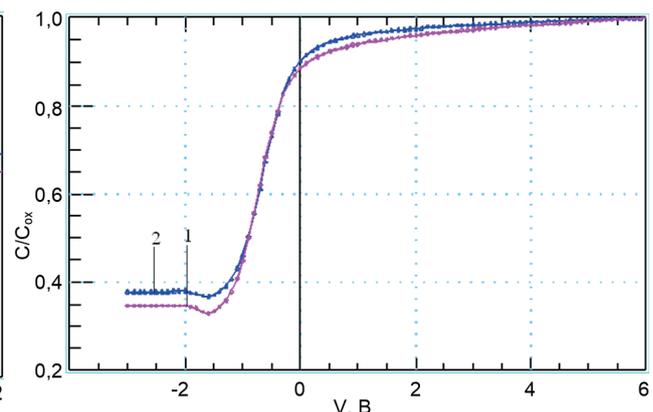
В результате исследований пространственного распределения КРП с использованием метода сканирующего зонда Кельвина были получены карты распределения значений КРП по поверхности пластин с пространственным разрешением 1 мм. Такое представление результатов (рисунок 4) позволило оценить не только средние значения потенциала для каждого из исследованных образцов, но также и равномерность распределения электрофизических свойств поверхности и выявить места локализации дефектов границы раздела кремний-двуокись кремния, характеризующиеся резкими отклонениями локальных значений КРП.



**Рисунок 2** – Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КДБ 12: 1 – с предварительной быстрой термообработкой; 2 – без предварительной быстрой термообработки

**Figure 2** – Capacitance-voltage (CV) curves of MOS structure produced by pyrogenic oxidation of KDB 12 silicon wafer: 1 – with preliminary rapid thermal treatment; 2 – without preliminary rapid thermal treatment

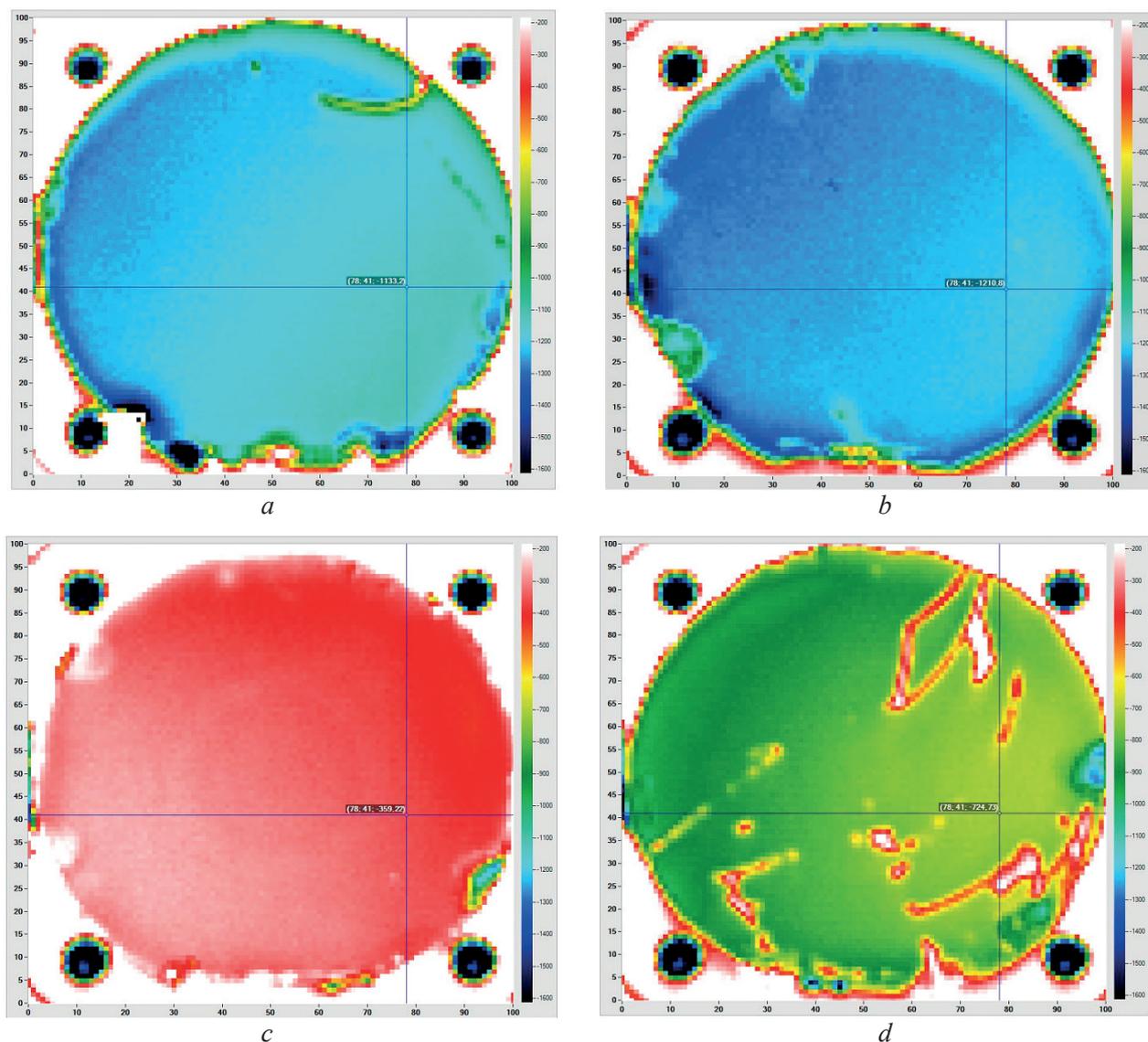
Данные исследования показали, что после проведения быстрой термической обработки наблюдается равномерное распределение поверхностного потенциала по площади пластины (рисунок 4). При этом имеет место значительное повышение электрического поверхностного потенциала на границе раздела кремний-двуокись кремния. Так, на пластинах КЭФ 4,5, не проходивших предварительной быстрой термообработки, КРП повы-



**Рисунок 3** – Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КЭФ 4,5: 1 – с предварительной быстрой термообработкой; 2 – без предварительной быстрой термообработки

**Figure 3** – Capacitance-voltage (CV) curves of MOS structure produced by pyrogenic oxidation of KEF 4,5 silicon wafer: 1 – with preliminary rapid thermal treatment; 2 – without preliminary rapid thermal treatment

силась с  $-1,211$  до  $-0,215$  В, а для пластин, прошедших обработку, она повысилась с  $-1,134$  до  $-0,052$  В. В случае пластин КДБ 12 эти величины составили с  $-0,725$  до  $-0,210$  В и с  $-0,359$  до  $-0,284$  В соответственно. Во всех случаях наблюдалось значительное повышение однородности распределения поверхностного потенциала, что видно по уменьшению величины разброса регистрируемых значений КРП. С учетом данных



**Рисунок 4** – Распределение поверхностного потенциала в системе  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  по площади пластины после быстрой термообработки на пластинах кремния с предварительной быстрой термообработкой и без нее: *a* – для кремния КЭФ 4,5 без обработки; *b* – для кремния КЭФ 4,5 с обработкой; *c* – для кремния КДБ 12 без обработки; *d* – для кремния КДБ 12 с обработкой

**Figure 4** – Surface potential distribution in  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  structure after rapid thermal treatment for previously treated wafers and non-treated ones: *a* – non-treated KEF 4,5 silicon wafer; *b* – treated KEF 4,5 silicon wafer; *c* – non-treated KDB 12 silicon wafer; *d* – treated KDB 12 silicon wafer

результатов можно утверждать о существенном улучшении свойств границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры двуокиси кремния по всей ее толщине.

Анализ пробивных напряжений и токов утечки двуокиси кремния показал, что на пластинах, не проходивших быструю термообработку, пробивное напряжение меньше, а ток утечки выше, чем у пленки на пластинах, проходивших такую обработку (таблица 2). В таблице также приве-

дено сопоставление полученных результатов с величинами плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, определенными путем анализа вольт-фарадных характеристик. Из данных таблицы следует, что проведение быстрой термообработки приводит к уменьшению плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния от 2,6 до 3,7 раза для кремния КЭФ 4,5 и от 3,2 до 4,3 раза для кремния КДБ 12. При этом изменение КРП составляет порядка плюс 1,0 В для кремния КЭФ 4,5 и от плюс 0,08 В до плюс 0,5 В для кремния КДБ 12.

Таблица 2 / Table / 2

**Параметры двуокиси кремния, выращенной на кремнии с предварительной быстрой термообработкой и без нее**  
**Properties of silicon dioxide layers grown after preliminary rapid thermal treatment and without preliminary treatment**

Параметры двуокиси кремния Silicon dioxide properties	Тип пластины Wafer type				
	КЭФ 4,5 KEF 4,5		КДБ 12 KDB 12		
	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	
Толщина пленки, нм Layer thickness, nm	48,1	48,1	48,4	48,5	
Пробивное напряжение, В Breakdown voltage, V	51,83	53,58	60,5	60,9	
Ток утечки, нА (при напряжении 20 В) Leakage current, nA (at 20 V voltage)	0,622	0,536	0,712	0,590	
КРП, В CPD, V	Исходное Initial	–1,211	–1,134	–0,725	–0,359
	После обработки After treatment	–0,215	–0,052	–0,210	–0,284
Плотность заряда, см <sup>–2</sup> Charge density, cm <sup>–2</sup>	Исходное Initial	5,26·10 <sup>10</sup>	3,41·10 <sup>10</sup>	3,80·10 <sup>11</sup>	3,52·10 <sup>11</sup>
	После обработки After treatment	1,43·10 <sup>10</sup>	1,33·10 <sup>10</sup>	1,16·10 <sup>11</sup>	8,16·10 <sup>10</sup>

Видно, что во всех случаях повышение регистрируемых значений КРП поверхности коррелирует с уменьшением плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния. В то же время установить однозначную взаимосвязь абсолютной величины изменения КРП с величиной относительного или абсолютного изменения плотности заряда по полученным данным не представляется возможным. Данная неоднозначность может быть объяснена многофакторностью параметра КРП, определяемого, как следует из характеристики метода, не только плотностью заряда на границе раздела, но и в целом характеристиками дефектности границы раздела (наличием и плотностью дислокаций, толщиной нарушенного слоя и др.), влияющими на локальные значения РВЭ поверхности полупроводниковой пластины [18–20]. Таким образом, исследования пространственного распределения поверхностного потенциала дают качественную оценку изменения плотности заряда на границе раздела

кремний-двуокись кремния, обеспечивают пространственную локализацию изменений зарядовых состояний, но не позволяют количественно определить величину данного изменения.

В целом полученные результаты говорят о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-двуокись кремния, полученной его пироженным окислением, после быстрой термообработки. Уменьшению плотностей фиксированного заряда и быстрых поверхностных состояний при быстрой термической обработке может способствовать фотоионизация и ускорение процессов диффузии под воздействием светового потока, приводящие к уменьшению концентрации межузельных атомов кремния вблизи межфазной границы раздела [10]. Кроме того, такая обработка интенсифицирует процессы замены гидроксильных ионов мостиковыми ионами кислорода с высвобождением некоторого количества водорода. Снижение фиксированного заряда и плотности быстрых поверхностных

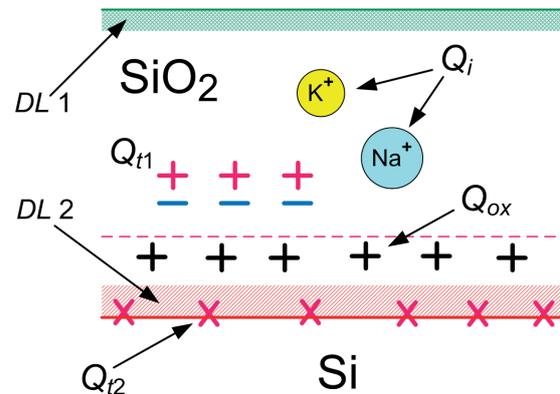
состояний при отжиге в неактивной среде также может быть обусловлено вышеуказанными причинами в условиях отсутствия генерации межузельных атомов кремния, что уменьшает их концентрацию вблизи межфазной границы раздела с увеличениями температуры и времени отжига [18, 19].

Учитывая наличие большого разброса от пластины к пластине глубины нарушенного слоя на их рабочей поверхности, которая, по данным проведенных исследований, лежит в пределах от 3 до 100 нм, следует ожидать значительных изменений при термическом окислении таких пластин толщины поверхностного слоя двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой. Это должно приводить к низкой воспроизводимости заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, что и имеет место на практике. Наглядно данный эффект можно наблюдать на приведенных на рисунках 5a и 5c картах распределения поверхностного потенциала, характеризующихся большим разбросом значений КРП по поверхности пластины. Проведение быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин и пленок двуокиси кремния, выращенных на их поверхности, позволяет значительно стабилизировать зарядовые свойства границы раздела такой системы из-за уменьшения глубины нарушенного слоя в исходных кремниевых пластинах и совершенствования структуры выращенных пленок. Это также приводит к уменьшению разброса значений КРП поверхности, наблюдаемому на рисунках 5b и 5d.

Такое поведение заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния обуславливается следующими причинами. Известно, что при термическом окислении в двуокиси кремния формируется положительный фиксированный заряд, не зависящий от приложенного потенциала, а также заряд быстрых поверхностных состояний, изменяющийся под его действием [21]. Величина этих зарядов во многом определяется температурой и средой при окислении кремния. При уменьшении температуры окисления, что имеет место в нашем случае, данные заряды растут, а при последующих отжигах уменьшаются, образуя треугольник Дила. При этом поверхностные состояния локализованы непосредственно на границе раздела  $\text{SiO}_2$ -Si и обусловлены оборванными связями кремния и представляют собой атом кремния на границе раздела с неспаренным электроном  $sp^3$ -гибридной орбитали, связанный с тремя атомами кремния  $\text{Si}_3 \equiv \text{Si}$  [21, 22]. Их образование

обусловлено несоответствием кристаллических структур Si и  $\text{SiO}_2$ . За образование фиксированного заряда при термическом окислении отвечают межузельные атомы кремния в двуокиси кремния. Величина заряда определяется количеством однократно ионизованных межузельных атомов кремния вблизи межфазной границы, которые оказываются там за счет их генерации на данной границе и диффузии вглубь окисла. Согласно представленному механизму образования заряда, уменьшение фиксированного заряда и плотности быстрых поверхностных состояний с ростом температуры процесса окисления связано с увеличениями коэффициента диффузии межузельных атомов кремния и их последующей рекомбинации на межфазной границе, преобладающими над скоростью генерации межузельных атомов кремния на данной границей.

Все это позволяют утверждать, что заряд сосредоточен как в слое двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой, т.е. в верхней части подзатворного диэлектрика, так и в остальном объеме диэлектрика, в том числе и на границе раздела кремний-двуокись кремния (рисунок 5).



**Рисунок 5** – Типы зарядов в системе кремний-оксид кремния: DL 1 – поврежденный слой  $\text{SiO}_2$ ; DL 2 – поврежденный слой Si;  $Q_i$  – подвижный ионный заряд;  $Q_{ox}$  – фиксированный заряд в окисле;  $Q_{t1}$  – заряд на ловушках в окисле;  $Q_{t2}$  – заряд на ловушках на границе раздела

**Figure 5** – Charge types in Si-SiO<sub>2</sub> structure: DL 1 – damaged SiO<sub>2</sub> layer; DL 2 – damaged Si layer;  $Q_i$  – mobile ion charge;  $Q_{ox}$  – fixed oxide charge;  $Q_{t1}$  – trapped oxide charge;  $Q_{t2}$  – interface oxide charge

Это утверждение основано на том, что нарушенный слой на рабочей стороне пластины приводит к образованию в верхней части растущего слоя двуокиси кремния нарушенной микроструктуры, которая практически отсутствует у пластин

с предварительной быстрой термообработкой. Поскольку слои двуокиси кремния, выращенные на этих пластинах, не подвергались какому-либо дополнительному воздействию, то все их отличие состоит в наличии или отсутствии в их структуре верхнего слоя с нарушенной микроструктурой, которая влияет на все выше приведенные электрофизические параметры двуокиси кремния. Однако необходимо учитывать, что из-за низкой температуры окисления кремния зарядовые свойства такой системы во многом будут определяться данным фактором, т.е. величина заряда в значительной степени будет зависеть от структуры остального объема двуокиси кремния и состояния его границы с кремнием.

Анализ результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, также показывает, что значения пробивных напряжений и токов утечки на пластинах КДБ 12 отличаются от аналогичных величин на пластинах КЭФ 4,5. Как видно, напряжение пробоя двуокиси кремния и ток утечки на пластинах КДБ 12 выше, чем на пластинах КЭФ 4,5. Такое поведение данных параметров связано с образованием заряда в двуокиси кремния, который для пластин КДБ 12 на порядок выше, чем заряд в двуокиси кремния на пластинах КЭФ 4,5. Это вызывает образование инверсного слоя в кремнии в случае пластин КДБ 12 (рисунок 2), приводя к дополнительному падению на нем приложенного напряжения, величина которого при пробое диэлектрика должна достигнуть значения лавинного пробоя инверсного слоя, тем самым увеличивая напряжение пробоя диэлектрика. Наличие такого заряда также обуславливает по сравнению с диэлектриком на пластинах КЭФ 4,5 более высокие токи утечки.

В случае двуокиси кремния на пластинах КЭФ 4,5 возникающий заряд приводит к обогащению кремния отрицательными носителями заряда, приводящими к увеличению их концентрации на границе раздела, вызывая тем самым увеличение электрического поля в диэлектрике. Возникающий при этом заряд на порядок ниже, чем для кремния *p*-типа проводимости, и не вызывает инверсию типа проводимости подложки. Однако накопление положительного заряда в двуокиси кремния создает дополнительное электрическое поле на границе с кремнием, вызывая уменьшение ширины потенциального барьера и тем самым снижая напряжение пробоя.

Изменение поверхностного потенциала по площади пластины соответствует изменению

работы выхода электронов с поверхности, а следовательно, позволяет говорить об изменении структуры поверхностного слоя в полупроводниковой структуре. Учитывая результаты по напряжению плоских зон и плотности заряда, можно утверждать, что качество границы раздела в этом случае выше, чем на пластинах без обработки. Поскольку на границу раздела двуокись кремния-кремний оказывает влияние, в том числе, плотность заряда, находящегося в верхней части диэлектрической пленки, где имеет место нарушение ее микроструктуры, то для формирования качественной границы раздела необходимо создавать слои двуокиси кремния с высокой однородностью микроструктуры по всей толщине. В противном случае это будет приводить к низкой воспроизводимости порогового напряжения МОП и КМОП транзисторов, а также высоты барьера Шоттки.

Таким образом, проведение предварительной быстрой термообработки исходных кремниевых пластин позволяет значительно улучшить электрофизические параметры выращиваемых на их поверхности слоев двуокиси кремния, а именно: увеличить пробивное напряжение на 3–5 %, уменьшить ток утечки в 3,75 раза, снизить заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния в 1,5 раза, уменьшить напряжение плоских зон на 3–5 %, уменьшить разброс по площади пластины величины поверхностного потенциала в системе кремний-двуокись кремния. Зависимость напряжения пробоя слоев двуокиси кремния, выращенных пирогенным окислением, от типа проводимости кремния обусловлена образованием инверсного слоя на границе раздела полупроводник-диэлектрик для кремния *p*-типа проводимости и обогащением поверхностного слоя кремния электронами для *n*-типа. Скачкообразное увеличение емкости для кремния *p*-типа проводимости в области перехода от обеднения к инверсии при определенном пороговом напряжении обусловлено изменением эффективного заряда за счет дрейфа ионов гидроксильных групп и водорода к границе раздела кремний-двуокись кремния под воздействием положительного потенциала.

## Заключение

Показано, что результаты исследования пространственного распределения поверхностного потенциала структуры кремний-двуокись кремния на основе бесконтактного неразрушающего

метода сканирующего зонда Кельвина хорошо согласуются с данными исследования традиционными контактными методами плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, пробивных напряжений и токов утечки структуры в рамках существующих теоретических моделей. Изменение регистрируемых значений поверхностного потенциала качественно отражает изменение плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния в процессе технологической обработки полупроводниковых пластин.

Результаты исследования продемонстрировали отсутствие однозначной количественной взаимосвязи поверхностного потенциала структуры кремний-диэлектрик с плотностью заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния при наличии качественной взаимосвязи данных параметров. Существенное влияние на величину поверхностного потенциала оказывают дефекты границы раздела, в частности толщина поверхностного слоя двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой.

Предварительная быстрая термообработка исходных кремниевых пластин приводит к увеличению структурного совершенства их рабочей поверхности за счет уменьшения глубины нарушенного слоя, позволяет улучшить электрофизические параметры выращиваемых на их поверхности слоев двуокиси кремния, а именно: увеличить пробивное напряжение, уменьшить ток утечки, снизить заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния, уменьшить напряжение плоских зон, снизить разброс и величину поверхностного потенциала в системе кремний-двуокись кремния по площади пластины.

Неоднородности распределения поверхностного потенциала наглядно отражают неоднородности распределения толщины нарушенного в процессе окисления слоя по поверхности пластины и позволяют выявить места локализации дефектов, связанных с нарушением структуры полупроводника у границы раздела кремний-двуокись кремния.

Таким образом, в существующем виде методы зондовой электрометрии являются эффективным дополнением традиционных методов контроля полупроводниковых структур, обеспечивая получение ранее недоступной информации о зарядовом состоянии и распределении дефектов диэлектрического слоя до и после технологических операций не только в виде обобщенной оценки

величины электрофизических параметров, но и в виде карт пространственного распределения данных параметров по поверхности пластины, что не обеспечивается традиционными методами контроля.

## Список использованных источников

1. *Schroder, D.K.* Semiconductor Material and Device Characterization / D.K. Schroder // Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. – 2006. – 790 p. doi: 10.1002/0471749095
2. *Schroder, D.K.* Trends in Lifetime Measurements / D.K. Schroder // Electrochemical Society Proceedings. – 2000. – Vol. 17. – P. 365–383.
3. *Everaert, J.L.* Contactless Mobility Measurements of Inversion Charge Carriers on Silicon Substrates with SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> Gate Dielectrics / J.L. Everaert [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96. – P. 122906. doi: 10.1063/1.3373920
4. *Oborina, E.I.* Noncontact interface trap determination of SiO<sub>2</sub>-4H-SiC structures / E.I. Oborina, A.M. Hoff // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107. – P. 013703. doi: 10.1063/1.3272081
5. *Schroder, D.K.* Contactless Surface Charge Semiconductor Characterization / D.K. Schroder // Materials Science and Engineering: B. – 2002. – Vol. 91–92. – P. 196 – 210. doi: 10.1016/S0921-5107(01)00993-X
6. *Schroder, D.K.* Silicon Epitaxial Layer Recombination and Generation Lifetime Characterization / D.K. Schroder [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, no. 4. – P. 906–912. doi: 10.1109/TED.2003.812488
7. *Komin, V.V.* Status of Non-contact Electrical Measurements / V.V. Komin, A.F. Bello, C.R. Brundle, Y.S. Uritsky // AIP Conference Proceedings. – 2003. – Vol. 683. – P. 782–795. doi: 10.1063/1.1622559
8. *Воробей, П.И.* Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / П.И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.
9. *Pogosov, V.V.* Effect of deformation on surface characteristics of finite metallic crystals / V.V. Pogosov, O.M. Shtepa // Ukr. J. Phys. – 2002. – Vol. 47, no. 11. – P. 1065–1070.
10. *Nazarov, A.* Application of Volta potential mapping to determine metal surface defects / A. Nazarov, D. Thierry // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 52. – P. 7689–7696. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.077
11. *Neaton, J.B.* Electronic properties of the Si/SiO<sub>2</sub> interface from first principles / J.B. Neaton, D.A. Muller, N.W. Ashcroft // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85, No. 6. – P. 1298–1301.

12. Технология СБИС : в 2 т. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 405 с.
13. Zharkikh, Yu.S. Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method / Yu.S. Zharkikh, S.V. Lysochenko // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 400. – P. 71–76. doi:10.1016/j.apsusc.2016.12.085
14. Тявловский, А.К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина / А.К. Тявловский // *Приборы и методы измерений*. – 2012. – № 1(4). – С. 30–36.
15. Gorban, A.P. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method / A.P. Gorban, V.G. Litovchenko, P.Ch. Peikow // *Phys. State Sol. (a)*. – 1972. – Vol. 10, no. 1. – P. 289–292.
16. Горлов, М.И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Д.Л. Ануфриев. – Минск : Бел. наука, 2006. – 367 с.
17. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // *ФТП*. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.
18. Александров, О.В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О.В. Александров, А.И. Дусь // *ФТП*. – 2011. – Т. 45, вып. 4. – С. 474–480.
19. Herbert, G. Origin of the fixed charge in thermally oxidized silicon / G. Herbert // *J. Electrochem. Soc.* – 1977. – Vol. 124, no. 2. – P. 314–317.
20. Holiney, R.Yu. Investigation of the undersurface damaged layers in silicon wafers / R.Yu. Holiney, L.A. Matveeva, E.F. Venger // *Semiconductor phys., quantum electronics and optoelectronics*. – 1999. – Vol. 2, no. 4. – P. 10–12.
21. Хатько, В.В. Структуры металл-диоксид кремния-полупроводник для интегральных микросхем / В.В. Хатько. – Минск : БНТУ, 2009. – 234 с.
22. Румак, Н.В. Диэлектрические пленки в твердотельной микроэлектронике / Н.В. Румак, В.В. Хатько. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 192 с.
4. Oborina E.I., Hoff A.M. Noncontact interface trap determination of SiO<sub>2</sub>-4H-SiC structures. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol.107, pp. 013703. doi: 10.1063/1.3272081
5. Schroder D.K. Contactless Surface Charge Semiconductor Characterization. *Materials Science and Engineering: B*, 2002, vol. 91–92, pp. 196–210. doi: 10.1016/S0921-5107(01)00993-X
6. Schroder D.K., Choi B.D., Kang S.G., Ohashi W., Kitahara K., Opposits G., Pavelka T., Benton J. Silicon Epitaxial Layer Recombination and Generation Lifetime Characterization. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, vol. 50, no. 4, pp. 906–912. doi: 10.1109/TED.2003.812488
7. Komin V.V., Bello A.F., Brundle C.R., Uritsky Y.S. Status of Non-contact Electrical Measurements. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 683, pp. 782–795. doi: 10.1063/1.1622559
8. Vorobey R.I., Zharin A.L., Gusev O.K., Petlitsky A.N., Pilipenko V.A., Turtsevitch A.S., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L. [Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafers' surface potential]. *Devices and Methods of Measurements*, 2013, no. 2(7), pp. 67–72 (in Russian).
9. Pogosov V.V., Shtepa O.M. Effect of deformation on surface characteristics of finite metal-lic crystals. *Ukr. J. Phys.*, 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1065–1070.
10. Nazarov A., Thierry D. Application of Volta potential mapping to determine metal surface defects. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, pp. 7689–7696. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.077
11. Neaton J.B., Muller D.A., Ashcroft N.W. Electronic properties of the Si/SiO<sub>2</sub> interface from first principles. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 85, no. 6, pp. 1298–1301.
12. Cze S. [SBIC technology]. Vol. 1. Mir Publ., Moscow, 1984, 405 p. (in Russian).
13. Zharkikh Yu.S., Lysochenko S.V. Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 400, pp. 71–76. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.085
14. Tyavlovsky A.K. [Mathematical modeling of a distance dependence of a scanning Kelvin probe lateral resolution]. *Devices and Methods of Measurements*, 2012, no. 1(4), pp. 30–36 (in Russian).
15. Gorban A.P., Litovchenko V.G., Peikow P.Ch. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method. *Phys. State Sol. (a)*, 1972, vol. 10, no. 1, pp. 289–292.
16. Gorlov M.I., Yemelyanov V.A., Anufriev D.L. [Technological rejection and diagnostic tests of semiconductor production]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2006, 367 p. (in Russian).
17. Bobrova Ye.A., Omelyanovskaya N.M. [MOS structures capacitance-voltage characteristics peculiarities due to oxide charge]. *Fizika i Technika Poluprovodnikov*, 2008, vol. 42, iss. 11, pp. 1380–1383 (in Russian).

## References

1. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. / Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, Inc., 2006, 790 p. doi: 10.1002/0471749095
2. Schroder D.K. Trends in Lifetime Measurements. *Electrochemical Society Proceedings*, 2000, vol. 17, pp. 365–383.
3. Everaert J.L., Rosseel E., Dekoster J., Pap A., Meszaros A., Kis-Szabo K., Pavelka T. Con-tactless Mobility Measurements of Inversion Charge Carriers on Silicon Substrates with SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> Gate Dielectrics. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, pp. 122906. doi: 10.1063/1.3373920

18. Alexandrov O.V., Dus' A.I. [Model of fixed charge formation in thermal silicon dioxide]. *Fizika i Technika Poluprovodnikov*, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 474–480 (in Russian).

19. Herbert G. Origin of the fixed charge in thermally oxidized silicon. *J. Electrochem. Soc.*, 1977, vol. 124, no. 2, pp. 314–317.

20. Holiney R.Yu., Matveeva L.A., Venger E.F. Investigation of the undersurface damaged layers in

silicon wafers. *Semiconductor phys., quantum electronics and optoelectronics*, 1999, vol. 2, no. 4, pp. 10–12.

21. Khatko V.V. *Struktury metal-dioksid kremniya-poluprovodnik dlya integral'nykh mikroskhem* [Metal-silicon dioxide-semiconductor structures for integrated circuits]. Minsk, BNTU Publ., 2009, 234 p. (in Russian).

22. Rumak N.V., Khatko V.V. [Dielectric films in solid-state microelectronics]. Minsk, Navuka i tehnika Publ., 1990, 192 p. (in Russian).

УДК 536.51:681.5.015.3

# Методика определения характеристической кривой тепловой инерции авиационных датчиков температуры газов

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Россия

Поступила 16.08.2017

Принята к печати 24.10.2017

Эффективность коррекции динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов в системах автоматического управления работой газотурбинных двигателей зависит от точности установления функциональной зависимости постоянных времени применяемых датчиков температуры газов от условий теплообмена. Целью настоящей работы являлась разработка методики, позволяющей определять характеристические кривые тепловой инерции датчиков температуры газов без нахождения постоянных времени по экспериментальным переходным характеристикам.

Характеристические кривые для каждой постоянной времени определены в виде гиперболических зависимостей от коэффициента теплообмена чувствительного элемента датчиков температуры газов с газовым потоком. Параметры гиперболических зависимостей предложено устанавливать с помощью двумерного регрессионного анализа экспериментальных переходных характеристик, зарегистрированных при не менее чем трех различных коэффициентах теплообмена. Для этого разработаны вычислительные программы в системах *Mathcad 14* и *Mathcad 15*, позволяющие вводить исходные данные из переходных характеристик в соответствующие векторы или из таблиц, представленных в формате *Excel*. Показано, что переходные характеристики в трехмерных координатах «время – коэффициент теплообмена – значение переходной характеристики» образуют поверхность, параметры которой являются параметрами искомых гиперболических зависимостей.

Для конкретного применения методики приведены функции регрессии для динамических характеристик датчиков температуры газов, соответствующих первому и второму порядкам. Анализ характеристических зависимостей, полученных с помощью традиционных методик и по предлагаемому методу на примере одной постоянной времени, позволяет предположить, что предлагаемый метод более точно устанавливает зависимость динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов от условий теплообмена.

Показано, что алгоритм двумерного регрессионного анализа реализует нахождение значений параметров характеристических зависимостей, которые наилучшим образом приближают поверхность выбранной функции регрессии одновременно ко всем используемым для анализа экспериментальным переходным характеристикам.

**Ключевые слова:** динамические характеристики, датчики температуры газов, характеристические кривые.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

**Адрес для переписки:**

Сабитов А.Ф.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Россия  
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

**Address for correspondence:**

Sabitov A.F.

A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,  
K. Marx str., 10, Kazan 420111, Tatarstan, Russia  
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

**Для цитирования:**

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.

Методика определения характеристической кривой тепловой инерции авиационных датчиков температуры газов. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 4. С. 357–364.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

**For citation:**

Sabitov A.F., Safina I.A.

[Method for determination of the characteristic curve of the thermal inertia of aircraft gas temperature sensors]. *Devices and Methods of Measurements*. 2017, vol. 8, no. 4, pp. 357–364 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

# Method for determination of the characteristic curve of the thermal inertia of aircraft gas temperature sensors

Sabitov A.F., Safina I.A.

A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,  
K. Marx str., 10, Kazan 420111, Russia

Received 16.08.2017

Accepted for publication 24.10.2017

## Abstract

The effectiveness of correction of the dynamic characteristics of gas temperature sensors in automatic control systems for the operation of aircraft gas turbine engines depends on the accuracy of the time constants of the sensors used from heat exchange conditions. The aim of this work was to develop a new method for determining the characteristic curves of the thermal inertia of gas temperature sensors.

The new technique does not require finding the time constants of gas temperature sensors on the experimental transient characteristics. Characteristic curves for each time constant are defined as hyperbolic dependencies on the heat transfer coefficient of the gas temperature sensors sensing element with the gas flow. Parameters of hyperbolic dependencies are proposed to be established using two-dimensional regression analysis. For this purpose, special software has been developed in the Mathcad 14 and Mathcad 15. The software allows inputting the original data from the transient characteristics to the corresponding vectors or from tables in Excel format. It is shown that the transient characteristics in three-dimensional coordinates «time – heat transfer coefficient – the value of the transition characteristic» form a surface whose parameters are parameters of the desired hyperbolic dependencies.

For a specific application of the technique, the regression functions for the dynamic characteristics of gas temperature sensors corresponding to the first and second orders are given. Analysis of the characteristic dependencies suggests that the proposed method more accurately establishes the dependence of the dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors on heat exchange conditions.

It is shown that the algorithm of two-dimensional regression analysis realizes finding more accurate values of the parameters of the characteristic dependencies. The found parameters of the characteristic dependencies in a best way reach the surface of the chosen regression function at the same time to all the experimental transient characteristics.

**Keywords:** dynamic behavior, gas temperature sensors, characteristic curves.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

---

### Адрес для переписки:

Сабитов А.Ф.  
Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ,  
ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Россия  
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

### Address for correspondence:

Sabitov A.F.  
A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University,  
K. Marx str., 10, Kazan 420111, Tatarstan, Russia  
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru

### Для цитирования:

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.  
Методика определения характеристической кривой тепловой  
инерции авиационных датчиков температуры газов.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 357–364.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

### For citation:

Sabitov A.F., Safina I.A.  
[Method for determination of the characteristic curve of the thermal  
inertia of aircraft gas temperature sensors].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 357–364 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-357-364

## Введение

Современные летательные аппараты оснащены системами автоматического управления газотурбинными двигателями (ГТД) для обеспечения эффективной, надежной и безопасной работы двигателей при всех условиях эксплуатации. В связи с тем, что температура газового потока в проточных частях ГТД является одним из параметров, во многом определяющим не только абсолютные и удельные параметры двигателя, но и характеристики летательных аппаратов в целом, к точности и быстродействию измерения температуры газа соответствующими каналами систем автоматического управления предъявляются достаточно жесткие требования. Так, например, в работе [1] указывается, что погрешность регулирования температуры газа в установленных режимах не должна превышать 5–10 К, а в переходных режимах допустимая величина заброса температуры составляет 30–50 К на время не более 0,5–1 с. При этом отмечается, что скорость изменения температуры газа на переходных режимах может достигать 500 К/с.

Требуемая статическая точность измерения температуры успешно достигается термоэлектрическими преобразователями (термопарами), которые применяются в качестве штатных датчиков температур газов (ДТГ) в существующих ГТД летательных аппаратов и предполагается их дальнейшее использование по крайней мере в ближайшем будущем. Так, например, термопара градуировки ХА (хромель-алюмель) по ГОСТу 8.585-2001 может измерять статическую температуру до 1372 °С с точностью 1 °С.

Основным недостатком термоэлектрических ДТГ является их высокая тепловая инерционность, которая может быть оценена величиной показателя тепловой инерции (ПТИ)  $\epsilon_{0,63}$ . В отраслевом стандарте ОСТа 1 00418-81 приводятся примерные значения ПТИ для авиационных ДТГ с термоэлектродными градуировки ХА, выполненных из проволоки диаметром 1,2 мм, которые составляют от 1,1 до 2,8 с. Высокая инерционность термоэлектрических ДТГ устраняется путем включения в состав систем автоматического управления ГТД каналов или контуров коррекции динамических характеристик применяемых датчиков температур с целью снижения инерционности измерения нестационарных температур до требуемого уровня [1–5].

Однако для реализации оптимальной коррекции требуется непрерывное подстраивание

параметров каналов или контуров коррекции под изменяющиеся динамические характеристики ДТГ из-за изменения условий теплообмена чувствительных элементов ДТГ с газовым потоком при различных режимах работы ГТД. Алгоритм подстройки каналов или контуров коррекции строится при этом на установленной для применяемых ДТГ зависимости их инерционности от условий теплообмена или связанных с ними параметров ГТД.

Функциональную зависимость ПТИ термодатчиков от условий теплообмена принято называть характеристической кривой тепловой инерции, и традиционная методика ее определения включает следующие основные процедуры.

1. У исследуемого термодатчика регистрируются переходные характеристики  $h_i(\tau, \alpha_i)$  при различных условиях теплообмена  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) с измеряемой средой, например, при различных скоростях воздушного потока [6].

2. Используя различные методы обработки зарегистрированных переходных характеристик, определяют значения ПТИ  $\epsilon_{0,63}$ , соответствующих каждому испытанию [7–9].

3. По полученным значениям ПТИ и соответствующим им коэффициентам теплообмена определяют характеристическую кривую тепловой инерции термодатчика в виде графика или функциональной зависимости как  $\epsilon_{0,63}(\alpha)$ .

В работе [10] показано, что характеристические кривые тепловой инерции могут быть определены не только для ПТИ, но и для всех постоянных времени, входящих в передаточные функции различных порядков ДТГ. Там же отмечено, что для решения задач коррекции динамических характеристик ДТГ предпочтительно использовать постоянную времени динамической модели датчика, представленной в виде апериодического звена первого порядка, а не ПТИ  $\epsilon_{0,63}$ .

Целью данной работы являлась разработка методики, позволяющей определять характеристические кривые тепловой инерции датчиков температуры, в том числе и ДТГ, без нахождения постоянных времени по экспериментальным переходным характеристикам.

## Основная часть

В работе [10] показано, что в случае представления передаточной функции ДТГ в виде:

$$W(p) = \frac{1}{T(\alpha)p + 1}, \quad (1)$$

(где  $p$  – оператор дифференцирования), постоянная времени  $T(\alpha)$  может быть представлена в виде гиперболической функции:

$$T(\alpha) = \frac{1}{\Psi\alpha} + T_\infty, \quad (2)$$

где  $\Psi$  – некоторый постоянный коэффициент для конкретного ДТГ, находящегося в стадии регулярного режима, при  $\alpha = \text{const}$  и постоянной температуре измеряемой среды;  $T_\infty$  – постоянная времени при  $\alpha \rightarrow \infty$ .

Тогда переходная функция, соответствующая передаточной функции (1), приобретает вид:

$$h(\tau, \alpha) = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\frac{1}{\Psi\alpha} + T_\infty}\right). \quad (3)$$

Переходная функция (3) в трехмерных координатах  $\tau$ - $\alpha$ - $h(\tau, \alpha)$  может быть представлена в виде поверхности, где независимыми аргументами являются время переходного процесса  $\tau$  и коэффициент теплообмена  $\alpha$ , а постоянные параметры  $\Psi$  и  $T_\infty$  отвечают за кривизну поверхности  $h(\tau, \alpha)$ .

При этом экспериментальные переходные характеристики в трехмерных координатах представляются как кривые или точечные значения, находящиеся в параллельных плоскости «время  $\tau$  – значения переходной характеристики  $h(\tau, \alpha)$ » плоскостях, пересекающих ось  $\alpha$  в точках  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ . Таким образом, если поставить задачу установления значений параметров  $\Psi$  и  $T_\infty$  в (3), которые дадут наилучшее приближение экспериментальных переходных характеристик к поверхности (3), то характеристическая кривая вида (2) может быть найдена без определения значений постоянных времени  $T(\alpha_1), T(\alpha_2), T(\alpha_3), \dots, T(\alpha_N)$ , соответствующих каждому испытанию.

Подобная задача относится к классу двумерного регрессионного анализа и может решаться в различных математических пакетах и системах. Нами разработана программа нахождения параметров  $\Psi$  и  $T_\infty$  в (3) по экспериментальным переходным характеристикам авиационных ДТГ, предназначенная для использования в системах *Mathcad 14* и *Mathcad 15*.

Программа реализуется в следующей последовательности.

#### 1. Ввод исходных данных.

В векторах  $X$  и  $Z$  содержатся координаты точек экспериментальных переходных характе-

ристик, зарегистрированных при соответствующих значениях коэффициента теплообмена, а в векторе  $Y$  – сами значения коэффициентов теплообмена.

$$X := \begin{pmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{21} \\ \dots \\ \dots \\ \tau_{k1} \\ \tau_{12} \\ \tau_{22} \\ \dots \\ \dots \\ \tau_{i2} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \\ \dots \\ \dots \\ \tau_{m3} \\ \dots \\ \dots \\ \tau_{1N} \\ \tau_{2N} \\ \dots \\ \dots \\ \tau_{nN} \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_1 \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_3 \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_3 \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_N \\ \alpha_N \\ \dots \\ \dots \\ \alpha_N \end{pmatrix} \quad Z := \begin{pmatrix} h_1(\tau_{11}, \alpha_1) \\ h_1(\tau_{21}, \alpha_1) \\ \dots \\ \dots \\ h_1(\tau_{k1}, \alpha_1) \\ h_2(\tau_{12}, \alpha_2) \\ h_2(\tau_{22}, \alpha_2) \\ \dots \\ \dots \\ h_2(\tau_{i2}, \alpha_2) \\ h_3(\tau_{13}, \alpha_3) \\ h_3(\tau_{23}, \alpha_3) \\ \dots \\ \dots \\ h_3(\tau_{m3}, \alpha_3) \\ \dots \\ \dots \\ h_N(\tau_{1N}, \alpha_N) \\ h_N(\tau_{2N}, \alpha_N) \\ \dots \\ \dots \\ h_N(\tau_{nN}, \alpha_N) \end{pmatrix}$$

#### 2. Ввод функции регрессии, например, вида:

$$z(A, B, x, y) := 1 - e^{-\frac{x}{Ay+B}},$$

где  $A$  соответствует параметру  $\Psi$ , а  $B$  – параметру  $T_\infty$  в (3).

3. Ввод вектора, формирующего сумму квадратов разностей между поверхностью функции регрессии и значениями экспериментальных переходных характеристик:

$$S(A, B) := \sqrt{\sum [z(A, B, X, Y) - Z]^2}.$$

#### 4. Ввод начальных условий для искомых параметров:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \Psi \\ T_\infty \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \Psi \\ T_\infty \end{pmatrix}.$$

#### 5. Ввод ключевого слова, открывающего блок решения системы уравнений, содержащих

функцию *MinErr*:

Given

$$S(A, B) = 0.$$

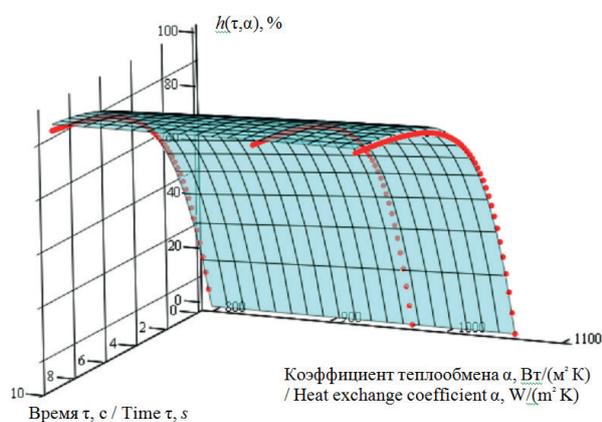
6. Поиск минимума функций двух переменных с использованием функции *MinErr*:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} := \text{MinErr}.$$

7. Результат вычисления искомых параметров:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{"}\Psi\text{"} \\ \text{"}T_\infty\text{"} \end{pmatrix}.$$

Результаты двумерного регрессионного анализа можно также представить в виде графиков.



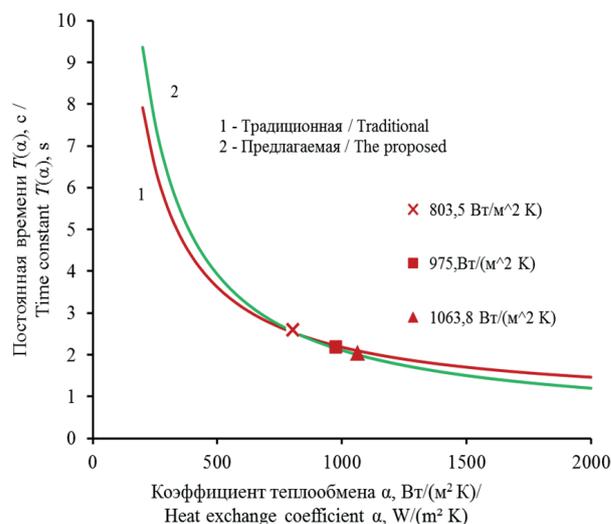
(X, Y, Z), H

**Рисунок 1** – Графики поверхности функции регрессии и трех экспериментальных переходных характеристик

**Figure 1** – Surface graphs of regression function and experimental transient characteristics

На рисунке 1 для примера приведена диаграмма с графиком поверхности (3), а на рисунке 2 – характеристическая кривая вида (2), полученные по предлагаемому методу при обработке трех экспериментальных переходных характеристик некоторого опытного ДТГ, зарегистрированных при скорости воздушного потока 95, 130 и 150 м/с. Указанным скоростям воздушного потока соответствуют коэффициенты теплообмена  $\alpha$ , равные 803,5; 975,8 и 1063,8 Вт/(м<sup>2</sup> К). Экспериментальные переходные характеристики некоторого опытного ДТГ получены на воздушной установке, отвечающей требованиям отраслевого стандарта ОСТ 1 00418-81. Для сравнения на рисунке 2 представлена характеристическая кривая,

полученная с помощью традиционной методики при обработке тех же трех экспериментальных переходных характеристик.



**Рисунок 2** – Характеристическая кривая тепловой инерции опытного датчика температуры газов, описываемого передаточной функцией первого порядка: 1 – традиционная; 2 – предлагаемая

**Figure 2** – The characteristic curve of the thermal inertia of an experimental gas temperature sensors in describing its dynamic properties by a first-order transfer function: 1 – traditional; 2 – proposed

Если результаты зарегистрированных экспериментальных переходных характеристик ДТГ представлены в формате таблиц *Excel*, то их можно использовать в разработанной программе при вводе исходных данных путем обращения к функции *READFILE*, например следующим образом:

$D := \text{READFILE}(\text{«Имя файлаxls»}, \text{«Excel»}, 2)$

$$X := D^{(0)} \quad Y := D^{(1)} \quad Z := D^{(2)}$$

$$X = Y = Z =$$

Предлагаемый метод может быть применен и для нахождения характеристических кривых моделей ДТГ, имеющих порядок  $n \geq 2$ .

Для моделей ДТГ с  $n = 2$ , передаточная функция которых может быть представлена в виде:

$$W(p) = \frac{Ep + 1}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)},$$

функция регрессии в программе может выглядеть как:

$$z(A, B, C, D, K, L, x, y) := \left[ 1 - \frac{\frac{1}{Ay} + B - \left(\frac{1}{Ky} + L\right)}{\frac{1}{Ay} + B - \left(\frac{1}{Cy} + D\right)} \cdot e^{-\frac{x}{\left(\frac{1}{Ay} + B\right)}} + \frac{\frac{1}{Cy} + D - \left(\frac{1}{Ky} + L\right)}{\frac{1}{Ay} + B - \left(\frac{1}{Cy} + D\right)} \cdot e^{-\frac{x}{\left(\frac{1}{Cy} + D\right)}} \right]$$

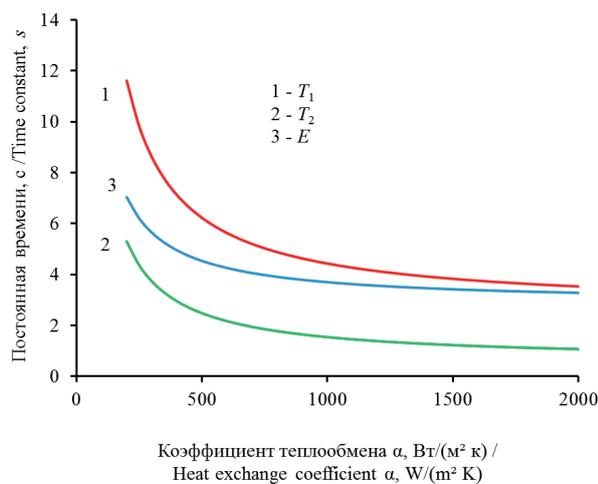
$$S(A, B, C, D, K, L) := \sqrt{\sum [z(A, B, C, D, K, L, X, Y) - Z]^2}.$$

Здесь  $A, B, C, D, K$  и  $L$  соответствуют параметрам, входящим в постоянные времени  $T_1(\alpha)$ ,  $T_2(\alpha)$  и  $E(\alpha)$  вида:

$$T_1(\alpha) = \frac{1}{A\alpha} + B; \quad T_2(\alpha) = \frac{1}{C\alpha} + D; \quad E(\alpha) = \frac{1}{K\alpha} + L.$$

По аналогии с выражением (3) в данной функции регрессии параметр  $x$  отвечает за время переходного процесса  $\tau$ , а параметр  $y$  – за коэффициент теплообмена  $\alpha$ .

Использование данного уравнения регрессии для тех же опытных ДТГ позволило получить характеристические кривые трех постоянных времени, изображенных на рисунке 3.



**Рисунок 3** – Характеристические кривые тепловой инерции опытного датчика температуры газов, описываемого передаточной функцией второго порядка: 1 –  $T_1$ ; 2 –  $T_2$ ; 3 –  $E$

**Figure 3** – The characteristic curve of the thermal inertia of an experimental gas temperature sensors in describing its second-order transfer function: 1 –  $T_1$ ; 2 –  $T_2$ ; 3 –  $E$

$$\alpha = \lambda \frac{C \text{Re}^n \text{Pr}^m}{d} = \lambda \frac{C \left(\frac{Vd}{\nu}\right)^n \left(\frac{\nu}{a}\right)^m}{d} = \lambda \frac{C \left(\frac{Vd\rho}{\eta}\right)^n \left(\frac{\eta c_p}{\lambda}\right)^m}{d}, \quad (4)$$

где  $C, n$  и  $m$  – эмпирические коэффициенты уравнения подобия, зависящие от значения числа  $\text{Re}$ ;  $V$  – скорость газового потока в камере торможе-

Анализ характеристических зависимостей, полученных с помощью традиционных методик и по предлагаемому методу на примере постоянной времени  $T$ , позволяет утверждать, что предлагаемый метод более точно устанавливает зависимость динамических характеристик авиационных ДТГ от условий теплообмена. Повышение точности обусловлено тем, что алгоритм двумерного регрессионного анализа реализует нахождение таких значений искомых параметров, которые наилучшим образом приближают поверхность выбранной функции регрессии одновременно ко всем используемым для анализа экспериментальным переходным характеристикам. При этом не требуется нахождение постоянных времени из экспериментальных переходных характеристик, что присутствует в традиционных методиках определения характеристических кривых и может внести дополнительные погрешности в их определение.

Характеристические кривые тепловой инерции авиационных датчиков температуры газов являются наиболее достоверными с точки зрения зависимости их динамических свойств от условий теплообмена с газовым потоком. Следует отметить, что в качестве коэффициента теплообмена  $\alpha$  в характеристической кривой выступает средний по поверхности чувствительного элемента датчика температуры газов коэффициент теплообмена, который вычисляется, как правило, по уравнениям подобия. Для термоэлектрических датчиков температуры газов с проволочными чувствительными элементами, помещенными в камеру торможения, для расчета  $\alpha$  используется одно из следующих соотношений в случае их поперечного обтекания газовым потоком:

ния ДТГ;  $d$  – диаметр чувствительного элемента ДТГ;  $\lambda, \nu, \eta, a, \rho$  и  $c_p$  – теплофизические характеристики газового потока.

Скорость газового потока в камере торможения ДТГ связана со скоростью газового потока в зоне размещения ДТГ известным соотношением:

$$V = V_0 \sqrt{\frac{1-\xi}{1-\zeta}}, \quad (5)$$

где  $\xi$  – коэффициент восстановления термоприемника;  $\zeta$  – коэффициент восстановления чувствительного элемента термоприемника.

Поскольку измерять значение  $\alpha$  при эксплуатации ДТГ не представляется возможным, то на практике измеряют доступный для этого параметр ГТД, который наиболее близко связан с условиями теплообмена ДТГ с газовым потоком. Так, в работе [1] постоянная времени корректирующего устройства подстраиваются под изменение постоянной времени ДТГ по измеряемому значению давления в компрессоре ГТД. В другой работе [5] об изменении постоянной времени ДТГ при эксплуатации судят по изменению расхода обтекающего его газа.

Таким образом, в зависимости от выбранного параметра ГТД, подлежащего измерению для целей обеспечения оптимальной коррекции динамических характеристик ДТГ, необходимо в дальнейшем перестроить установленную зависимость (2) под выбранный параметр ГТД с учетом выражений (4) и (5).

Предлагаемая методика может быть использована и для других контактных датчиков температур, если они могут быть отнесены к линейным аналоговым средствам измерения с сосредоточенными параметрами в рабочих условиях и их динамические характеристики зависят от условий теплообмена с измеряемой средой.

## Заключение

Предложена методика для определения характеристических кривых тепловой инерции датчиков температуры газовых потоков, не требующая нахождения постоянных времени выбранной математической модели датчиков по экспериментальным переходным характеристикам. Для реализации данной методики разработаны вычислительные программы в системах *Mathcad 14* и *Mathcad 15*, позволяющие также импортировать исходные данные из таблиц в формате *Excel*.

Предложенная методика разработана на основании предположения, что все постоянные времени имеют гиперболическую зависимость от коэф-

фициента теплообмена с измеряемой средой, что следует из теории регулярного теплового режима.

В отличие от известных методик предлагаемая позволяет непосредственно устанавливать параметры гиперболических зависимостей по экспериментальным переходным характеристикам, зарегистрированных при различных коэффициентах теплообмена, без нахождения по ним постоянных времени.

Повышение точности определения характеристических кривых тепловой инерции датчиков температуры предлагаемой методикой зависит в общем случае от числа экспериментальных переходных характеристик, зарегистрированных при различных коэффициентах теплообмена, диапазона коэффициента теплообмена и выбранной математической модели датчика. Для рассмотренного опытного датчика температуры газов повышение точности определения постоянных времени моделей первого и второго порядков составляет не менее 20 %.

Дальнейшее развитие исследований предполагает разработку теоретически обоснованных рекомендаций по выбору начальных значений параметров функций регрессии, которые обеспечат наилучшее решение поставленной задачи.

## Список использованных источников

1. Гольберг, Ф.Д. Методы управления газотурбинными двигателями по неизмеряемым параметрам с использованием бортовой математической модели двигателя / Ф.Д. Гольберг, О.С. Гуревич, А.А. Петухов // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями. Труды ЦИАМ № 1346 / под ред. О.С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 264 с.
2. Frid, A.I. Adaptive control of high turbine inlet temperature of aircraft gas turbine engine / A.I. Frid // Симпозиум по актуальным проблемам конструирования воздушных судов Уфа, 12–13 апреля 1999 г. – Уфа: Уфимский госуд. авиац. техн. университет. – 1999. – С. 101–106.
3. Jamroz, P. Relationship between dynamic coefficients of two temperature sensors under nonstationary flow conditions / P. Jamroz // IEEE Sens. J. – 2011. – Vol. 11, no. 1–2. – P. 335–340.
4. Zimmerschied, R. Nonlinear time constant estimation and dynamic compensation of temperature sensors / R. Zimmerschied, R. Isermann // Contr. Eng. Pract. – 2010. – Vol. 18, no. 3. – P. 300–310.
5. Петунин, В.И. Помехоустойчивый самонастраивающийся измеритель температуры газа ГТД / В.И. Петунин, Р.Р. Сибгатуллин, А.И. Фрид // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 1 (76). – С. 147–155.

6. Вави́ровская, С.Л. Автоматизация определения динамических и скоростных характеристик датчиков температуры на установке воздушной УВ-010 ЦИАМ / С.Л. Вави́ровская, Д.Л. Захаров, М.В. Корнеев // Автоматизация в промышленности. – 2016. – Т. 4. – С. 28–29.

7. Иосифов, В.П. Определение полных динамических характеристик средств измерений с применением рекуррентных процедур / В.П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 126–131.

8. Froehlich, T. Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors / T. Froehlich, S. Augustin, C. Ament // International Journal of Thermophysics. – 2015. – Vol. 36, no. 8. – P. 2115–2123.

9. Сабитов, А.Ф. Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов / А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218.

doi: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

10. Сабитов, А.Ф. Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов / А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 7–14.

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

## References

1. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Petuhov A.A. *Metody upravleniya gazoturbinnymi dvigatelyami po neizmeryаемым parametram s ispol'zovaniem bortovoi matematicheskoi modeli dvigatelya* [Methods for controlling gas turbine engines using non-measurable parameters using the onboard mathematical model of the engine]. Moscow, TORUS PRESS Pubb., 2010, Works CIAM no. 1346, 264 p.

2. Frid A.I. [Adaptive control of high turbine inlet temperature of aircraft gas turbine engine]. *Simposium po aktual'nyh problemam konstruirovaniya vozdukhnyh sudov* [Symposium on Actual Problems of Aircraft Engines Construction]. Ufa, Apr. 12–13, 1999. Ufa, Ufa

State Aviation Technical University, 1999, pp. 101–106 (in Russian).

3. Jamroz P. Relationship between dynamic coefficients of two temperature sensors under nonstationary flow conditions. *IEEE Sens. J.*, 2011, vol. 11, no. 1–2, pp. 335–340.

4. Zimmerschied R., Isermann R. Nonlinear time constant estimation and dynamic compensation of temperature sensors. *Contr. Eng. Pract.*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 300–310.

5. Petunin V.I., Sibagatullin R.R., Frid A.I. [Robust self-adjusting temperature of the gas meter GTD]. *Vestnik UGATU* [Vestnik Ufa State Aviation Technical University], 2015, vol. 19, no. 1 (67), pp. 147–155 (in Russian).

6. Vavirovskaja S.L., Zaharov D.L., Korneev M.V. [Automation determination of dynamic and high-speed characteristics of temperature sensors in the installation of air УВ-010 CIAM]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation industry], 2016, vol. 4, pp. 28–29 (in Russian).

7. Iosifov V.P. [Determination of the full dynamic characteristics of measuring instruments with the use of recurrent procedures]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*. [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2011, no. 1 (17), pp. 126–131 (in Russian).

8. Froehlich T., Augustin S., Ament C. Temperature-Dependent Dynamic Behavior of Process Temperature Sensors. *International Journal of Thermophysics*, 2015, vol. 36, no. 8, pp. 2115–2123.

9. Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors]. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 211–218 (in Russian).

doi: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

10. Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

УДК 620.179.14

## Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности

Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.

Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 21.09.2017

Принята к печати 09.11.2017

Для придания камере сгорания жидкостного ракетного двигателя требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толстослойных никелевого (до 700 мкм) и хромового (до 200 мкм) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения. Основной проблемой существующих в настоящее время неразрушающих методик определения толщин рассматриваемых покрытий является то, что они могут использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию со стороны внутренней стенки камеры сгорания до и после нанесения хромового покрытия на подслой никеля. Однако когда уже готовое изделие поступает на последующие этапы сборки на другое предприятие, то часто встает вопрос входного контроля толщин покрытий из никеля и хрома. В данном случае применить существующие методики контроля на готовом изделии не представляется возможным либо их использование приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Целью работы являлась разработка методики неразрушающего определения толщин описанных двухслойных покрытий магнитным пондеромоторным методом в условиях одностороннего доступа к готовому изделию со стороны хромового покрытия.

Предложена новая методика неразрушающего определения толщин никелевого и хромового покрытий двухслойной структуры на готовом изделии без априорных данных о свойствах или толщинах этих покрытий или изделия в целом с использованием магнитного пондеромоторного метода.

Разработанная методика реализована в толщиномере двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1, который успешно применяется предприятиями ракетно-космической отрасли Российской Федерации.

**Ключевые слова:** толщинометрия, двухслойные покрытия, никель, хром, магнитный пондеромоторный метод.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

---

**Адрес для переписки:**

Гнутенко Е.В.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

---

**Address for correspondence:**

Gnutenko Y.V.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

---

**Для цитирования:**

Гнутенко Е.В., Рудницкий В.А.  
Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромового покрытия магнитным пондеромоторным методом при одностороннем доступе к контролируемой поверхности.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 365–373.  
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

---

**For citation:**

Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.  
[Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 365–373 (in Russian).  
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

# Determination of the thickness of the components of a double-layer nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with unilateral access to the controlled surface

Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 21.09.2017

Accepted for publication 09.11.2017

## Abstract

The application of thick-layer nickel (up to 700  $\mu\text{m}$ ) and chromium (up to 200  $\mu\text{m}$ ) coatings has been widely used to give the combustion chamber of a liquid-propellant rocket engine the required operational properties. The main parameter that determines the ability of a coating to fulfill its function is its thickness and uniformity of its distribution. The main problem of current nondestructive methods for determining the thickness of coatings under consideration is that they can be used only at the stage of production of rocket engineering products, when there is an access to the product from the side of the inner wall of the combustion chamber before and after applying a chromium coating to the nickel sublayer. However, when an already finished product arrives at subsequent stages of assembly to another enterprise, there is often a need of incoming control of the thicknesses of coatings from nickel and chromium. In this case, it is not possible to apply existing control techniques to a finished product, or the use of these techniques leads to unacceptable errors in the results of measurements. The goal of the research was to develop a technique for nondestructive determination of the thickness of each component of the two-layer nickel-chromium coating by the magnetic ponderomotive method under conditions of unilateral access to the finished product from the side of the chromium coating.

A new technique for nondestructive determination of the thicknesses of nickel and chromium coatings of the double-layer structure on a finished product without a priori data on the properties or thicknesses of these coatings or a product in general is proposed using a magnetic ponderomotive method.

This newly developed technique is implemented in the thickness gauge TEP-XN1 of double-layer nickel-chromium coatings, which is successfully used by enterprises of the rocket and space industry of the Russian Federation.

**Keywords:** thickness gauging, double-layer coatings, nickel, chromium, magnetic ponderomotive method.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

---

### Адрес для переписки:

Гнutenко Е.В.  
Институт прикладной физики НАН Беларуси,  
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь  
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

---

### Address for correspondence:

Gnutenko Y.V.  
Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences  
of Belarus,  
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus  
e-mail: gnutenkoev@gmail.com

---

### Для цитирования:

Гнutenко Е.В., Рудницкий В.А.  
Определение толщин составляющих двухслойного никель-хромо-  
вого покрытия магнитным ponderомоторным методом при одно-  
стороннем доступе к контролируемой поверхности.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 365–373.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

---

### For citation:

Gnutenko Y.V., Rudnitsky V.A.  
[Determination of the thickness of the components of a double-layer  
nickel-chromium coating by magnetic ponderomotive method with  
unilateral access to the controlled surface].  
*Devices and Methods of Measurements.*  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 366–374 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-365-373

## Введение

Характеристики и надежность современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) во многом определяются свойствами специальных покрытий, применяемых при их производстве [1, 2]. Одним из основных элементов любого ЖРД является камера сгорания. Для придания ей требуемых эксплуатационных свойств наиболее широкое применение нашло нанесение толстослойных никелевого (Ni, до 700 мкм) и хромового (Cr, до 200 мкм) покрытий. При этом главным параметром, определяющим способность покрытия выполнять свою функцию, является его толщина и равномерность ее распределения [3, 4].

Важно отметить, что камера сгорания является весьма сложным изделием для неразрушающего контроля, так как представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких оболочек с изменяющейся толщиной и геометрией, выполненных из различных материалов. Так, стенка камеры сгорания в разрезе состоит из двухслойного никель-хромового покрытия, нанесенного на бронзовую оболочку стального корпуса. Все перечисленные факторы обуславливают необходимость разработки специализированных толщиномеров. В настоящее время широкое применение для контроля толщин покрытий таких изделий нашли магнитные толщиномеры, в частности основанные на пондеромоторном или магнитоотрывном методе [5], поскольку данный метод практически не чувствителен к кривизне поверхности контролируемого изделия и изменению толщины стенок камеры сгорания.

Основной проблемой существующих в настоящее время неразрушающих методик [6, 7, 8] определения толщин рассматриваемых покрытий является то, что они могут использоваться только на стадии производства изделий ракетной техники, когда есть доступ к изделию со стороны внутренней стенки до и после нанесения хромового покрытия на подслой никеля. Однако когда уже готовое изделие поступает на последующие этапы сборки на другое предприятие, то часто встает вопрос входного контроля толщин покрытий из никеля и хрома. В данном случае применить предложенные методики контроля, описанные в [6, 7, 8], на готовом изделии не представляется возможным либо их использование приводит к недопустимым погрешностям результатов измерений. Это вызвано взаимным влиянием толщины хромового покрытия на результат измере-

ния толщины никелевого покрытия и толщины никелевого покрытия на результат измерения толщины хромового покрытия. Поэтому вопрос об определении толщин компонентов двухслойных никель-хромовых покрытий является достаточно важным и практически значимым. Целью работы являлась разработка методики неразрушающего определения толщин описанных двухслойных покрытий магнитным пондеромоторным методом в условиях одностороннего доступа к готовому изделию со стороны хромового покрытия.

## Методика

Представленные в данной статье результаты экспериментальных исследований были получены авторами в рамках выполнения данной работы с помощью нового разработанного толщиномера двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1 с использованием образцов никелевых фольг четырех номиналов толщин (200 мкм, 300 мкм, 400 мкм, 700 мкм), а также четырех немагнитных пленок толщиной 50 мкм, 90 мкм, 125 мкм и 185 мкм. Будем считать, что применяемые никелевые фольги являются полным аналогом никелевого покрытия нанесенного на немагнитное основание, а немагнитные пленки являются имитаторами хромового покрытия.

Теоретической основой для решения обозначенной задачи является работа [8], в которой на основании использования понятия скалярного магнитного потенциала получено обобщенное аналитическое выражение для оценки силы притяжения постоянного магнита к двухслойной структуре в виде никель-хромового покрытия, нанесенного на немагнитное основание.

Из анализа этого выражения можно сделать вывод, что применяя два различных по своим характеристикам устройства для пондеромоторной толщинометрии двухслойных никель-хромовых покрытий, на одном и том же изделии мы получаем систему из двух уравнений (1) с двумя неизвестными толщинами никелевого  $h_{Ni}$  и хромового  $h_{Cr}$  покрытий:

$$\begin{cases} F_1(h_{Ni}, h_{Cr}) = -k_1 \pi \mu_{Ni} J_M a_1 h_{Ni} \left( 1 - 3 \frac{h_{Cr}}{a_1} + 6 \frac{h_{Cr}^2}{a_1^2} \right), \\ F_2(h_{Ni}, h_{Cr}) = -k_2 \pi \mu_{Ni} J_M a_2 h_{Ni} \left( 1 - 3 \frac{h_{Cr}}{a_2} + 6 \frac{h_{Cr}^2}{a_2^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_1, F_2$  – результаты измерения силы отрыва постоянного магнита от двухслойного никель-хро-

мового покрытия на немагнитном основании для первого и второго устройств соответственно,  $H$ ;  $k_1, k_2$  – коэффициенты пропорциональности, характеризующие конструктивное исполнение двух рассматриваемых устройств;  $\mu_{Ni}$  – магнитная восприимчивость никелевого покрытия;  $J_M$  – намагниченность постоянного магнита, определяемая свойствами материала из которого изготовлен магнит,  $A \cdot m^2$ ;  $a_1, a_2$  – полюсные расстояния постоянных магнитов в каждом из устройств, м.

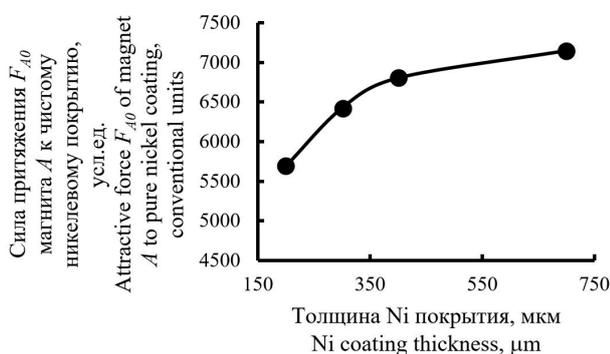
Необходимо отметить, что данная система уравнений не имеет однозначного аналитического решения, а решить ее численно затруднительно в первую очередь из-за невозможности на практике точно определить полюсное расстояние магнитов. В приведенных уравнениях (1) малая ошибка в численном определении полюсного расстояния может приводить к значительной погрешности в определении толщин покрытий. К тому же полюсное расстояние постоянного магнита может изменяться вследствие его взаимодействия с другим ферромагнетиком [9].

Для решения представленной системы уравнений (1) авторами был предложен следующий подход, основанный на использовании физических закономерностей изменения силы притяжения постоянных магнитов применительно к рассматриваемым двухслойным покрытиям. Данный подход был положен в основу новой методики измерения, заключающейся в применении двух постоянных магнитов с различными полюсными расстояниями  $a$ , имеющих максимально возможное значение намагниченности. Исходя из последнего требования в качестве материала

для изготовления магнитов нами был использован NdFeB (неодим-железо-бор). Как следует из анализа выражения, полученного в [8], магниты авторами были выбраны таким образом, чтобы один из них имел высокую чувствительность к толщине хромового покрытия, а второй – высокую чувствительность к толщине никелевого покрытия. Для этого первый магнит (магнит  $A$ ) имел значительно меньшее полюсное расстояние  $a$ , чем второй магнит (магнит  $B$ ). Регулировка полюсного расстояния  $a$  осуществлялась за счет изменения радиуса сферического наконечника постоянного магнита. В нашем случае для магнита  $A$  полюсное расстояние составляло примерно 0,4 мм, а для магнита  $B$  – порядка 2 мм.

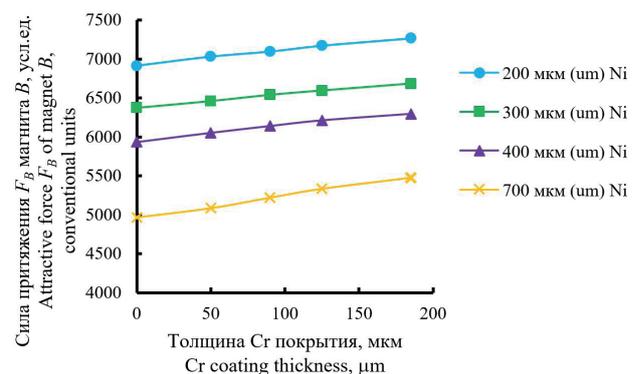
Суть предлагаемой методики состоит в получении двух результатов измерений магнитоотрывного усилия двумя магнитами  $A$  и  $B$  в одной точке на поверхности хромового покрытия готового изделия и вычисления по полученным ранее зависимостям толщин никелевого и хромового покрытий. При этом происходит исключение взаимного влияния толщин покрытий на результат измерения их толщин за счет использования «паразитной» чувствительности магнита  $B$  к толщине хромового покрытия.

Рассмотрим подробнее методику исключения влияния мешающих факторов на результат измерения. На основании полученных зависимостей силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к никелевому покрытию от его толщины в отсутствие хрома (рисунок 1) и силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к различным никелевым покрытиям при наложении различных по толщине пленок-имитаторов



**Рисунок 1** – Зависимость силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  от толщины никелевого покрытия при отсутствии хромового покрытия

**Figure 1** – Dependence of the attractive force  $F_{A0}$  of magnet  $A$  on the thickness of pure nickel coating in the absence of chrome coating



**Рисунок 2** – Зависимость силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к различным никелевым покрытиям от толщины хромового покрытия

**Figure 2** – Dependence of the attractive force  $F_B$  of magnet  $B$  to the various nickel coatings on the thickness of chrome coating

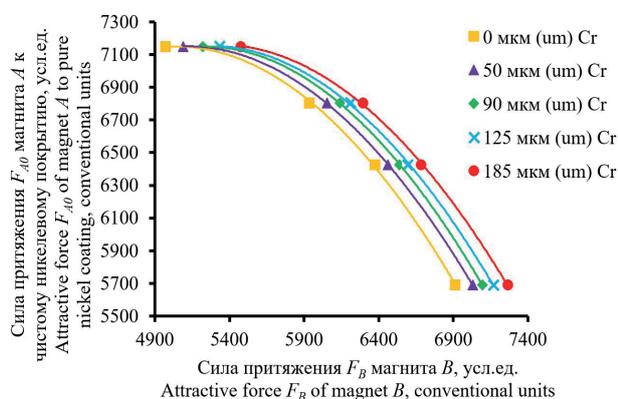
хромового покрытия (рисунок 2), необходимо получить семейство кривых (рисунок 3), связывающих силу притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре и силу притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию. Отметим, что в виду конструктивных особенностей прибора ТЭП-ХН1 приводимые нами для магнита  $B$  условные единицы измерения магнитоотрывного усилия на рисунке 2 и последующих графиках обратно пропорцио-

нальны силе притяжения постоянного магнита  $B$ .

Таким образом, каждому значению силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$ , полученному на конкретной толщине никелевого покрытия  $h_{Ni}$  при наложении на него пленки-имитатора немагнитного хромового покрытия толщиной  $h_{Cr}$ , необходимо поставить в соответствие значение силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию той же толщины  $h_{Ni}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Cr1}) \rightarrow F_{A0\_1}(h_{Ni1}), \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Cr1}) \rightarrow F_{A0\_2}(h_{Ni2}), \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Cr1}) \rightarrow F_{A0\_n}(h_{Nin}); \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Cr2}) \rightarrow F_{A0\_1}(h_{Ni1}), \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Cr2}) \rightarrow F_{A0\_2}(h_{Ni2}), \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Cr2}) \rightarrow F_{A0\_n}(h_{Nin}); \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Crn}) \rightarrow F_{A0\_1}(h_{Ni1}), \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Crn}) \rightarrow F_{A0\_2}(h_{Ni2}), \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Crn}) \rightarrow F_{A0\_n}(h_{Nin}). \end{array} \right.$$

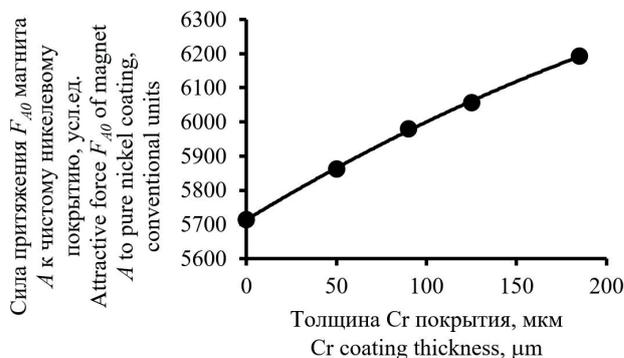
Данные зависимости (рисунок 3) представляют собой множество кривых, каждая из которых соответствует определенной толщине хромового покрытия. При этом изменение силы притяжения магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию вдоль каждой из представленных кривых определяется толщиной никелевого покрытия.



**Рисунок 3** – Зависимость силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию от силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре

**Figure 3** – Dependence of the attractive force  $F_{A0}$  of magnet  $A$  to the pure nickel coating on the attractive force  $F_B$  of magnet  $B$  to the double-layer nickel-chromium coating

Из рисунка 3 видно, что конкретному значению силы притяжения магнита  $B$  соответствует множество возможных значений силы притяжения магнита  $A$  к свободному от хрома никелевому покрытию, определяемое реальной толщиной хромового покрытия, что дополнительно отражено на рисунке 4.



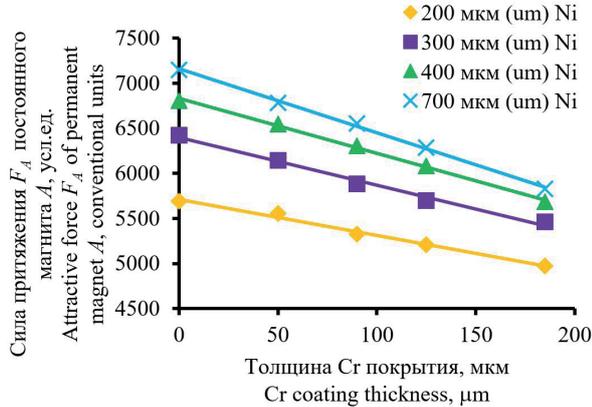
**Рисунок 4** – Частная зависимость силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию от толщины хромового покрытия соответствующая значению силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  ( $F_B = 6900$  усл. ед.) к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия

**Figure 4** – Partial dependence of the attractive force  $F_{A0}$  of magnet  $A$  to the pure nickel coating on the thickness of Cr coating corresponding to the value of the attractive force  $F_B$  of magnet  $B$  ( $F_B = 6900$  conventional units) to the double-layer nickel-chromium coating at a particular point of the product

Таким образом, при помощи построения зависимостей, изображенных на рисунке 3, мы исключили толщину никеля как мешающий фактор при определении толщины хромового покрытия на готовом изделии, используя для этого «паразитную» чувствительность магнита  $B$  к толщине хромового покрытия. Исключив влияние толщины никелевого покрытия, мы связали диапазон возможных значений силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию в конкретной точке изделия с диапазоном возможных

реальных значений толщин хромового покрытия (см. рисунок 4).

Согласно номограммам для определения толщины хрома магнитом  $A$ , полученным в соответствии с методикой [8] и представленным на рисунке 5, сила притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к никелевому покрытию без хрома является базовым значением для расчета толщины хромового покрытия.



**Рисунок 5** – Номограммы для определения толщины хромового покрытия магнитом  $A$

**Figure 5** – Nomograms for determining the thickness of chrome coating by using magnet  $A$

Следовательно, для определения толщины хромового покрытия мы при помощи магнита  $B$  перешли от зависимости на рисунке 1, по которой, как отмечалось выше, невозможно работать на реальном изделии в виду отсутствия доступа к поверхности никелевого покрытия, к зависимости на рисунке 3.

Определим толщину хромового покрытия  $h_{Cr}$  располагая результатами измерения  $F_A$  магнитом  $A$  и  $F_B$  магнитом  $B$  отрывных усилий в одной точке на поверхности двухслойной никель-хромовой структуры готового изделия.

Как видно из рисунка 5, для силы притяжения  $F_A$  магнита  $A$  к двухслойной никель-хромовой структуре справедлива линейная зависимость вида:

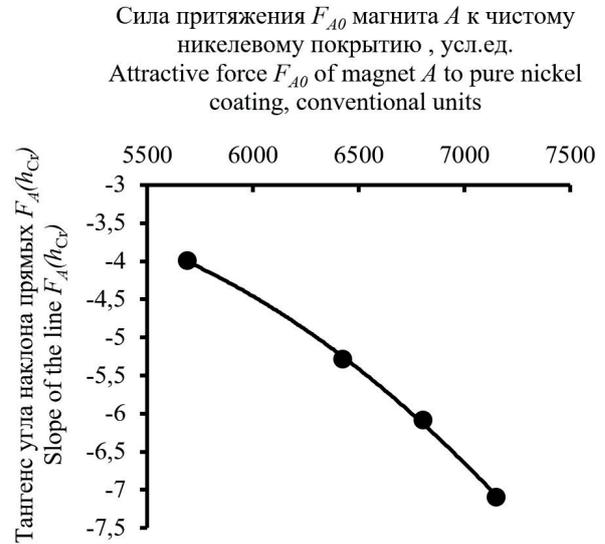
$$F_A(F_{A0}, h_{Cr}) = -k(F_{A0})h_{Cr} + F_{A0}, \quad (2)$$

где  $k(F_{A0})$  – тангенс угла наклона номограмм для определения толщины хромового покрытия,  $F_{A0}$  – сила притяжения магнита  $A$  к никелевому покрытию без хрома ( $h_{Cr} = 0$  мкм).

Тангенс угла наклона  $k$  номограмм для определения толщины хромового покрытия (рису-

$$F_A(h_{Cr}) = \left[ a_1(-a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2)^2 - b_1(-a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2) + c_1 \right] h_{Cr} - a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2. \quad (5)$$

нок 5) связан с силой притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  на чистом никелевом покрытии ( $h_{Cr} = 0$  мкм) нелинейной зависимостью, полученной на основании данных рисунка 5 и представленной на рисунке 6.



**Рисунок 6** – Зависимость тангенса угла наклона прямых  $F_A(h_{Cr})$  от силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к никелевому покрытию при отсутствии хромового покрытия

**Figure 6** – Dependence of the slope of the line  $F_A(h_{Cr})$  on attractive force  $F_{A0}$  of magnet  $A$  to the pure nickel coating in the absence of chrome coating

Согласно рисунку 6, зависимость  $k(F_{A0})$  можно описать следующим образом:

$$k(F_{A0}) = -a_1F_{A0}^2 + b_1F_{A0} + c_1, \quad (3)$$

где  $a_1, b_1, c_1$  – постоянные величины.

Подставляя измеренное значение силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия в зависимость, приведенную на рисунке 3, мы получим множество искомым значений силы притяжения  $\{F_{A0\_1}, F_{A0\_2}, \dots, F_{A0\_i}\}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию, которые могут иметь место для данной точки изделия, что отражено на рисунке 4.

Полученное множество  $\{F_{A0\_1}, F_{A0\_2}, \dots, F_{A0\_i}\}$  можно описать полиномом второй степени:

$$F_{A0}(h_{Cr}) = -a_2h_{Cr}^2 + b_2h_{Cr} + c_2, \quad (4)$$

где  $a_2, b_2, c_2$  – постоянные величины.

Подставляя в выражение (2) уравнения (3) и (4) получим зависимость  $F_A(h_{Cr})$ :

Таким образом, полученный результат измерения силы  $F_B$  на поверхности двухслойной никель-хромовой структуры и зависимости, представленные на рисунках 3 и 4, позволили в выражении (2) для силы притяжения магнита  $A$  исключить неизвестное нам значение силы притяжения  $F_{A0}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию и связать между собой  $F_A$  и  $h_{Cr}$  через постоянные коэффициенты. Т.е. мы перешли от функции двух аргументов  $F_A(F_{A0}, h_{Cr})$  к функции одного аргумента  $F_A(h_{Cr})$ .

Полученное выражение (5) является уравнением пятого порядка относительно  $h_{Cr}$ . Согласно теореме Абеля–Руффини, алгебраические уравнения  $n$ -ой степени (при  $n \geq 5$ ) в общем случае не имеют аналитического решения, так как не существует формул, которые давали бы возможность вычислить корни уравнения по его коэффициентам. Однако можно найти решения этого уравнения при помощи численных методов.

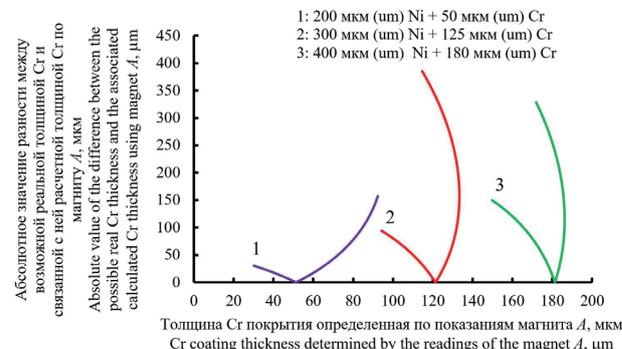
Подставляя возможные значения  $h'_{Cr}$  из диапазона 0–200 мкм в выражение (4) (зависимость на рисунке 4), получим множество значений силы притяжения  $\{F_{A0_1}, F_{A0_2}, \dots, F_{A0_i}\}$  магнита  $A$  к чистому никелевому покрытию. Исходя из значений полученного множества, необходимо рассчитать согласно выражению (3) или кривой на рисунке 6 возможные тангенсы угла наклона  $k(F_{A0_i})$  для выражения (2) (номограмм на рисунке 5). Подставляя в выражение (2) результат измерения магнитом  $A$  отрывного усилия  $F_A$ , а также возможные значения тангенсов угла наклона  $k(F_{A0_i})$  и начальные точки привязки  $F_{A0_i}$ , можно получить множество  $\{h_{Cr_1}, h_{Cr_2}, \dots, h_{Cr_i}\}$  возможных толщин хромового покрытия в данной точке изделия.

За действительное значение толщины хромового покрытия  $h_{Cr}$  должно быть взято одно из значений полученного множества  $\{h_{Cr_1}, h_{Cr_2}, \dots, h_{Cr_i}\}$ , которое имеет наименьшее расхождение с одним из значений  $h'_{Cr}$  диапазона  $\{h'_{Cr_1}, h'_{Cr_2}, \dots, h'_{Cr_i}\}$  реальных толщин хромового покрытия, которое использовалось для вычисления силы притяжения  $F_{A0_i}$  и, соответственно,  $h_{Cr_i}$ . Другими словами, за действительное значение  $h_{Cr}$  берется такое значение

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Cr1}) \rightarrow h_{Ni1} \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Cr1}) \rightarrow h_{Ni2} \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Cr1}) \rightarrow h_{Nin} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Cr2}) \rightarrow h_{Ni1} \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Cr2}) \rightarrow h_{Ni2} \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Cr2}) \rightarrow h_{Nin} \end{array} \right\}; \dots; \left\{ \begin{array}{l} F_{B1}(h_{Ni1}, h_{Cr_m}) \rightarrow h_{Ni1} \\ F_{B2}(h_{Ni2}, h_{Cr_m}) \rightarrow h_{Ni2} \\ \vdots \\ F_{Bn}(h_{Nin}, h_{Cr_m}) \rightarrow h_{Nin} \end{array} \right\}$$

Данные зависимости представляют собой множество кривых, каждая из которых соответ-

ствует определенной толщине хромового покрытия. Для этого необходимо на основании данных, представленных в виде графиков на рисунке 2, построить зависимость толщины никелевого покрытия от силы притяжения магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре (рисунок 8). Т.е. каждому значению силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$ , полученному на конкретной толщине никелевого покрытия  $h_{Ni}$  при наложении на него пленки-имитатора немагнитного хромового покрытия толщиной  $h_{Cr}$ , ставится в соответствие значение толщины этого никелевого покрытия  $h_{Ni}$ :

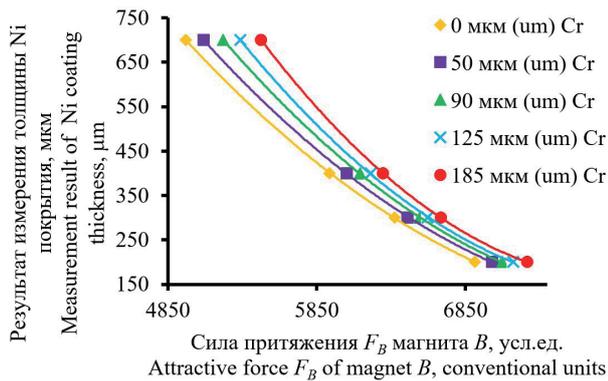


**Рисунок 7** – Зависимость значения разности  $|h'_{Cr_i} - h_{Cr_i}|$  между возможной реальной толщиной Cr  $h'_{Cr}$  и связанной с ней расчетной толщиной Cr по магниту  $A$   $h_{Cr_i}$  от толщины  $h_{Cr_i}$ .

**Figure 7** – Dependence of the absolute value of the difference between the possible real Cr thickness and the associated calculated Cr thickness using magnet  $A$  on the Cr thickness calculated using magnet  $A$

Зная действительную толщину хромового покрытия в двухслойном никель-хромовом покрытии, нанесенном на немагнитное основание, возможно рассчитать действительное значение толщины никелевого покрытия. Т.е. исключить влияние толщины хромового покрытия на результат измерения толщины никелевого покрытия. Для этого необходимо на основании данных, представленных в виде графиков на рисунке 2, построить зависимость толщины никелевого покрытия от силы притяжения магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре (рисунок 8). Т.е. каждому значению силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$ , полученному на конкретной толщине никелевого покрытия  $h_{Ni}$  при наложении на него пленки-имитатора немагнитного хромового покрытия толщиной  $h_{Cr}$ , ставится в соответствие значение толщины этого никелевого покрытия  $h_{Ni}$ :

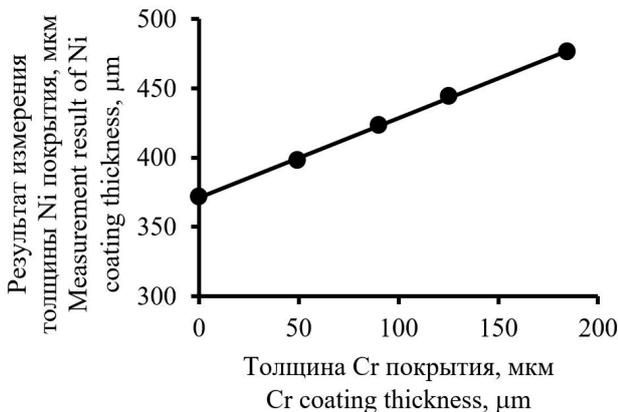
Данные зависимости представляют собой множество кривых, каждая из которых соответ-



**Рисунок 8** – Зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  к двухслойной никель-хромовой структуре

**Figure 8** – Dependence of the measurement result of Ni coating thickness on the attractive force  $F_B$  of magnet  $B$  to the double-layer nickel-chromium coating

Как видно из рисунка 8, одному значению силы притяжения магнита  $B$  к готовому изделию в конкретной точке контроля соответствует множество значений толщин никелевого покрытия в зависимости от толщины хромового покрытия, что дополнительно отражено на рисунке 9.



**Рисунок 9** – Частная зависимость результата измерения толщины никелевого покрытия от толщины хромового покрытия для значения силы притяжения  $F_B$  магнита  $B$  ( $F_B = 6053$  усл. ед.) к двухслойной никель-хромовой структуре в конкретной точке изделия

**Figure 9** – Partial dependence of the measurement result of Ni coating thickness on the Cr coating thickness corresponding to the value of the attractive force  $F_B$  of magnet  $B$  ( $F_B = 6053$  conventional units) to the double-layer nickel-chromium coating at a particular point of the product

Следовательно, определив действительную толщину хромового покрытия в заданной точке изделия по предложенной выше методике, можно, согласно рисунку 9, определить действительную толщину никелевого покрытия.

## Заключение

Разработана методика, позволяющая неразрушающим способом определить толщины составляющих двухслойного никель-хромового покрытия, нанесенного на немагнитное основание, при одностороннем доступе к контролируемому изделию без априорных данных о свойствах или толщинах этих покрытий или изделия в целом. Методика заключается в получении двух результатов измерений  $F_A$  и  $F_B$  магнитоотрывного усилия двумя различными постоянными магнитами в заданной точке контроля, один из которых имеет высокую чувствительность к толщине никелевого покрытия (обладает большим полюсным расстоянием), а другой – к толщине хромового покрытия (характеризуется малым полюсным расстоянием). С использованием результатов измерений  $F_A$  и  $F_B$  осуществляется расчет искомых толщин покрытий из никеля и хрома по специальным предварительно полученным градуировочным зависимостям для указанных магнитов.

Разработанная методика реализована в толщиномере двухслойных никель-хромовых покрытий ТЭП-ХН1, который успешно применяется предприятиями ракетно-космической отрасли Российской Федерации.

## Список использованных источников

1. Воробей, В.В. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В.В. Воробей, В.Е. Логинов. – М. : Изд-во МАИ, 2001. – 496 с.
2. Ras, J. Design of Liquid Propellant Rocket Engines / J. Ras. – LULU Press, 2016. – 412 с.
3. Макаров, Ю.Н. Актуальные проблемы неразрушающего контроля качества космической техники : монография / Ю.Н. Макаров, В.Е. Прохорович, А.И. Птушкин [и др.]. – СПб. : Альтеор, 2008. – 336 с.
4. Schlesinger, M. Modern Electroplating (5th Edition) / M. Schlesinger, M. Paunovic. – John Wiley & Sons, Inc, 2010. – 736 с. doi: 10.1002/9780470602638
5. Blitz, J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing / J. Blitz. – Springer Science & Business Media, 2012. – 261 с. doi: 10.1007/978-94-011-5818-3
6. Потапов, А.И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько. – СПб. : Гуманистика, 2009. – 904 с.
7. Лухвич, А.А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины двухслойных покрытий / А.А. Лухвич, О.В. Булатов // Дефектоскопия. – 2008. – № 10. – С. 26–34.

8. Рудницкий, В.А. Определение толщины двух-слойных никель-хромовых покрытий магнитным методом / В.А. Рудницкий, Е.В. Гнутенко, А. П. Крень // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 24–29.

9. Ravaud, R. Cylindrical magnets and coils: Fields, forces, and inductances / R. Ravaud, G. Lemarquand, S. Babic, V. Lemarquand, C. Akyel // IEEE Transactions on Magnetics.– 2010. – No. 46 (9). – P. 3585–3590.  
**doi:**10.1109/TMAG.2010.2049026

## References

1. Vorobei V.V., Loginov V.E. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigatelei* [Technology of the production of liquid-propellant rocket engines]. Moscow, Moscow Aviation Institute Publ., 2001, 496 p. (in Russian).

2. Ras J. Design of Liquid Propellant Rocket Engines. LULU Press, 2016, 412 p.

3. Makarov Y.N, Prohorovich V.E., Ptushkin A.I. *Aktual'nye problemy nerazrushayushchego kontrolya kachestva kosmicheskoi tekhniki* [Actual problems of non-destructive quality control of space technology]. St. Peterburg, Alteor Publ., 2008, 336 p. (in Russian).

4. Schlesinger M., Paunovic M. Modern Electroplating (5th Edition). John Wiley & Sons Inc., 2010, 736 p. **doi:** 10.1002/9780470602638

5. Blitz J. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer Science & Business Media, 2012, 261 p. **doi:** 10.1007/978-94-011-5818-3

6. Potapov A.I., Syas'ko V.A. *Nerazrushayushchie metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytii i izdelii* [Nondestructive Methods and Tools for Testing Thicknesses of Coatings and Products]. St. Petersburg, Gumanistika Publ., 2009, 904 p. (in Russian).

7. Luhvich A.A., Bulatov O.V. [The possibilities of the magnetodynamic method for controlling the thickness of double-layer coatings]. *Defektoskopiya* [Russian Journal of Nondestructive Testing], 2008, no. 10, pp. 26–34 (in Russian).

8. Rudnitsky V.A., Gnutenko E.V., Kren A.P. [Determination of the thickness of double-layer nickel-chromium coatings by magnetic method]. *Metrologiya i priborostroenie* [Metrology and instrument making], 2015, no. 4, pp. 24–29 (in Russian).

9. Ravaud, R., Lemarquand, G., Babic, S., Lemarquand, V., Akyel, C. Cylindrical magnets and coils: Fields, forces, and inductances. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, no. 46 (9), pp. 3585–3590.  
**doi:**10.1109/TMAG.2010.2049026

УДК 535.015

## Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 08.10.2017

Принята к печати 14.11.2017

При проектировании устройств для дистанционного зондирования Земли большое внимание уделяется оценке уровня дисторсии объективов и обеспечения требуемых значений точности при геометрической калибровке оптико-электронных систем в целом. Среди существующих средств, предназначенных для геометрической калибровки оптических систем, наибольшее распространение получили тест-объекты. Целью проводимых исследований являлось создание метода автоматического расчета поправочных коэффициентов дисторсии, а также обеспечение точности в процессе измерения на уровне 3 мкм.

Предложен метод проведения геометрической калибровки элементов внутреннего ориентирования оптической системы на основе электронного тест-объекта. Представлен расчет яркостного изображения строки теста из его многоспектрального изображения и определение положения экстремумов фильтрованного сигнала. Показано соотношение между величиной дисторсии и заданными значениями центра интервала. Рассмотрены три варианта электронных тест-объектов с различным шагом и размером элементов. Установлено, что оптимальным является калибровочный элемент размером  $3 \times 3$  пикселя, это обусловлено формой субпикселей, имеющих соотношение сторон излучающих площадок примерно 1 : 3. В качестве шаблона для построения электронного тест-объекта целесообразно использовать *IPS* матрицы. Представлена функциональная схема экспериментального контрольно-измерительного стенда на базе коллиматора и оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. Установлено, что тест-объекты с шагом сетки 4 и 8 пикселей не могут обеспечить изображение, удовлетворяющее требованиям качества и разрешения в связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптических поверхностях – существенно нарушается форма элементов. Для анализа величины дисторсии наилучшим образом подходят тест-объекты с шагом сетки 12 пикселей.

Представлены графики зависимости приращения координат от номера элемента для двух фотографических объективов *Canon* серии *EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* и *EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II*. Проведены расчет значений и оценка величины дисторсии в краевых зонах, которая соответственно составила 43 мкм и 51,6 мкм. Описана методика и алгоритм программной реализации. Указаны возможные направления развития метода.

**Ключевые слова:** дисторсия, дистанционное зондирование Земли, экспериментальный стенд, электронный тест-объект, оптико-электронная система.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

---

**Адрес для переписки:**

Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: feod@tut.by

---

**Address for correspondence:**

Fiodortcev R.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: feod@tut.by

---

**Для цитирования:**

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 374–385.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

---

**For citation:**

Kozhevnikov D.A., Fiodortcev R.V.

[The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 374–385 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

# The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object

Kozhevnikov D.A., Feodortsau R.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 08.10.2017

Accepted for publication 14.11.2017

## Abstract

Designing remote sensing of the Earth devices is requires a lot of attention to evaluation lens distortion level and providing the required accuracy values of geometric calibration of optoelectronic systems at all. Test-objects known as most common tools for optical systems geometric calibration. The purpose of the research was creating an automatically method of distortion correction coefficients calculating with a 3  $\mu\text{m}$  precision in the measurement process. The method of geometric calibration of the internal orientation elements of the optical system based on the electronic test object is proposed. The calculation of the test string brightness image from its multispectral image and filtered signal extrema position determination are presented. Ratio of magnitude of the distortion and interval center is given. Three variants of electronic test-objects with different step and element size are considered. Optimal size of calibration element was defined as  $3 \times 3$  pixels due to shape of the subpixels with the aspect ratio of the radiating areas about 1 : 3. It is advisable to use IPS as an electronic test object template. An experimental test and measurement stand functional diagram based on the collimator and optical bench «OSK-2CL» is showed. It was determined that test objects with a grid spacing of 4 and 8 pixels can't provide tolerable image because of non-collimated emission of active sites and scattering on optical surfaces – the shape of the elements is substantially disrupted. Test-object with a 12 pixels grid spacing was used to distortion level analyzing as most suitable.

Ratio of coordinate increment and element number graphs for two photographic lenses (Canon EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM and EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II) are presented. A calculation of the distortion values in edge zones was held, which were respectively 43  $\mu\text{m}$  and 51.6  $\mu\text{m}$ . The technique and algorithm of software implementation is described. Possible directions of the method development are mentioned.

**Keywords:** distortion, remote sensing of the Earth, an experimental stand, an electronic test object, optoelectronic system.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

---

### Адрес для переписки:

Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: feod@tut.by

---

### Address for correspondence:

Fiodortcev R.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: feod@tut.by

---

### Для цитирования:

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В.

Метод геометрической калибровки оптико-электронных систем на основе электронного тест-объекта.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 374–385.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

---

### For citation:

Kozhevnikov D.A., Fiodortcev R.V.

[The method of geometric calibration of optoelectronic systems based on electronic test object].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 374–385 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-374-385

## Введение

При разработке оптических узлов космических аппаратов необходимо с повышенным вниманием относиться к ошибкам, вызванным дисторсией объективов регистрирующих систем, смещение изображения в плоскости приемника для современных систем составляет порядка 8–12 мкм. В связи с представлением дисторсии как одной из главных aberrаций оптической системы, предназначенной для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), исправление данной aberrации требует повышенных значений точности при геометрической калибровке оптико-электронных приборов (ОЭП).

При проектировании оптических систем ДЗЗ одним из важнейших параметров является точность получения обрабатываемой информации. В настоящее время известно большое количество методов оценки точности геометрической калибровки\* [1–5]. Методы отличаются используемым оптическим и механическим оборудованием, видом и формой тест-объектов (ТО), математическими моделями расчета и аппроксимации значений, полученных при проведении измерений. Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования векторов с известной пространственной ориентацией, задание и определение которой и является основной задачей калибровки. Ее сущность заключается в получении калибровочных коэффициентов, учитывающих влияние всех систематических искажений, существующих при реальной фотосъемке. Среди существующих средств, предназначенных для геометрической калибровки оптических систем, наибольшее распространение получили тест-объекты. Одним из классических методов измерения считается горный полигон, большие перепады высот которого помогают проводить калибровку с высокой точностью. К безусловным недостаткам таких полигонов относится привязка к рельефу местности и невозможность обустройства подобного полигона в рамках границ Республики Беларусь, из чего следует распространенность использования ТО в лабораторных условиях.

При выборе метода изготовления тест-объектов основополагающими параметрами являются конечная точность калибровочных элементов

\*ISO 17850:2015-07 (E) Photography – Digital cameras – Geometric distortion (GD) measurements

и стоимость изготовления. Одними из самых экономичных методов являются электрографическая (лазерная) и светодиодная печать на принтере, обеспечивающие точность до 5 % и 3 % соответственно. Дальнейшее повышение точности возможно посредством применения метода лазерной гравировки, при котором точность позиционирования лазерного луча находится в пределах 5–10 мкм и который обеспечивает высокую стабильность размеров на полотнах из латуни, алюминии или стали. Самой распространенной технологией создания ТО является литография на стеклянных подложках, что позволяет строить оптические схемы в проходящем свете.

Внедрение новых технологий и автоматизации процессов расчета и обработки данных позволяет существенно снизить материальные и временные ресурсы, связанные с геометрической калибровкой элементов внутреннего ориентирования.

Целью проводимых исследований являлось создание метода автоматического расчета поправочных коэффициентов дисторсии, а также обеспечение точности в процессе измерения на уровне 3 мкм, которая определялась главным образом точностью используемого экспериментального измерительного оборудования.

## Геометрическая калибровка

Для электронного ТО необходимы ПЗС-матрицы с большим числом элементов и высокими стабильными выходными техническими характеристиками. Выполнять сканирование тест-объекта следует на максимальном физическом разрешении исследуемой фотографической оптической системы, чем обусловлено требование к размерам калибровочных элементов (для современных систем ДЗЗ  $\psi \approx 0,1''$ ). После получения сканированного изображения тест-объекта необходимо определить координаты по оси  $x$  для вертикальных линий в пикселях. Методика определения координат центров вертикальных линий теста основана на алгоритме оценки временного положения детерминированного сигнала на фоне аддитивного гауссовского шума [5]. Расчет состоит из нескольких этапов [6].

Расчет яркостного изображения строки теста из его многоспектрального изображения:

$$S_Y(x) = \sum_{r=0}^{nRad-1} S_r(x), \quad (1)$$

где  $S_Y(x)$  – яркостное изображение строки теста;  $S_r(x)$  – спектральные компоненты;  $nRad$  – количество спектральных компонент.

Применение к яркостному изображению согласованного фильтра с формой  $K(x)$  импульса вертикальной полосы:

$$S_{YF}(\tau) = \sum_x S_Y(x)K(x - \tau), \quad (2)$$

где  $S_{YF}(\tau)$  – яркостное изображение строки теста с фильтром;  $\tau$  – смещение по координате  $x$ .

Определение положения экстремумов фильтрованного сигнала изображения  $XM$ , соответствующие вертикальным линиям теста:

$$XM = \max_{\tau} S_{YF}(\tau), \quad (3)$$

где  $XM$  – относительные координаты линия теста.

Оценка кривой дисторсии происходит по следующим положениям.

Расчет графика дисторсии, как разности между положениями вертикальных линий, отстоящих между собой на расстоянии  $y$ :

$$y'(i) = XM_{i+y} - XM_i, \quad (4)$$

где  $y'$  – расстояние между проекциями линий тест-объекта в плоскости изображения,  $y$  – расстояние между линиями на тесте (рисунок 1). Расстояние между линиями в плоскости предмета и плоскости изображения не сохраняется вследствие присутствия в оптической системе дисторсии.

Значение  $y'(i)$  присваивается линии  $Coord(i)$ , соответствующей центру интервала (4).

$$Coord(i) = XM_i + y/2. \quad (5)$$

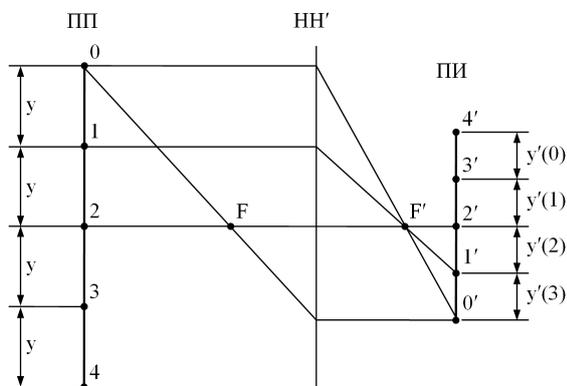


Рисунок 1 – Плоскость предмета (ПП) и плоскость изображений (ПИ) оптической системы

Figure 1 – The plane of the object (OP) and the image plane (IP) of the optical system

Далее необходимо произвести выбор полинома для обработки данных. Наиболее часто искажения описываются полиномами Эбнера, Якобсона, Грюна, Брауна и др. [5]. При значительном количестве разнообразных полиномов для задач настоящего исследования подходит один, базирующийся на методе – интегральная систематическая ошибка  $dx, dy$ , описываемая полиномом, представлена как сумма членов отдельных систематических искажений (дисторсии, деформации и т.д.) [7]:

$$\begin{aligned} \delta x = & a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + \\ & + \frac{x}{c(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3)} + \\ & + x(k_1r^2 + k_1r^4 + k_3r^6) + P_1(y^2 + 3x^2) + 2P_2xy + \delta x_p + \left(\frac{x}{c}\right)\delta c; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta y = & b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + \\ & + \frac{y}{c(c_1x^2 + c_2xy + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3)} + \\ & + x(k_1r^2 + k_1r^4 + k_3r^6) + 2P_2(x^2 + 3y^2) + 2P_1xy + \delta y_p + \left(\frac{x}{c}\right)\delta c, \end{aligned}$$

где  $a_1, \dots, a_7, b_1, \dots, b_7$  – коэффициенты, учитывающие некомпенсируемую деформацию и аномальную деформацию;  $c_1, \dots, c_7$  – коэффициенты, учитывающие кривизну и неплоскостность пластины;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, учитывающие радиальную дисторсию;  $P_1, P_2$  – коэффициенты, учитывающие нецентрированную дисторсию.

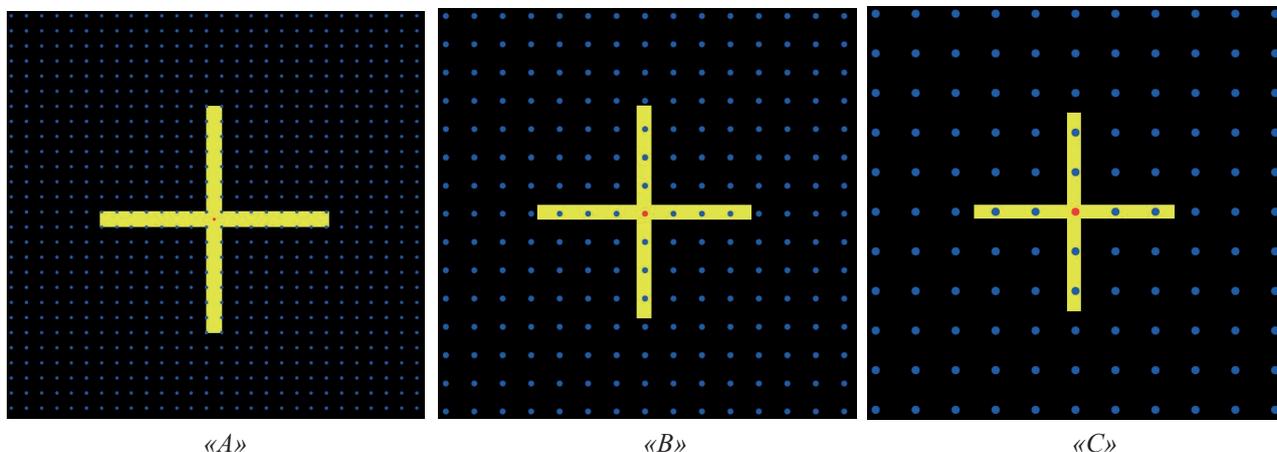
Обсуждения вопроса по выбору предпочтительной длины полинома включают в себя попытку соотнести два основных качества, исходящих из выбора длины полинома. С одной стороны, увеличение количества членов полинома детализирует описание систематических искажений, с другой стороны, ухудшается обусловленность матрицы нормальных уравнений, повышается загрузка памяти ЭВМ. Очевидно, что существуют определенные пределы количества членов полинома, обусловленные исходными материалами, а также быстродействием и объемом памяти ЭВМ. Поэтому длина и вид полинома могут изменяться для различных исходных данных [8].

## Разработка структуры тест-объекта

К ТО предъявляются множество требований по точности и структурированности. Для оценки дисторсии самым показательным является ТО в виде сетки, так как искажения линий на-

глядно демонстрируют относительную величину и функцию распределения дисторсии, однако из соображений удобства программной оценки коэффициентов выгоднее использовать не фор-

мальные пересечения линий, а материальные точки. В общем массиве элементов ТО (рисунок 2) следует выделить два: центральное перекрестие и центральную точку.



**Рисунок 2** – Центральные сегменты разработанных тест-объектов с шагом сетки: «А» – 4 пикс; «В» – 8 пикс; «С» – 12 пикс

**Figure 2** – Central segments of developed test-objects with a grid spacing: «А» – 4 pix; «В» – 8 pix; «С» – 12 pix

Функции указанных элементов заключаются в следующем: центральное перекрестие призвано обеспечить точное центрирование систем на начальном этапе юстировки, а центральная точка призвана выступать базисом при программном расчете. При этом важно учесть хроматическую определенность используемых в расчете объектов. Одним из простых способов учета может быть задание отдельных функциональных групп разными цветами. Так, не участвующее в расчетных операциях центральное перекрестие при задании отличным цветом просто не войдет в массив всех точек, определенный алгоритмом, а при задании центральной точки третьим цветом значительно упростится поиск базового элемента всего массива.

На рисунке 2 представлены сегменты разработанных тест-объектов с различными геометрическими параметрами (таблица 1), главным различием которых является шаг сетки – параметр, отвечающий за расстояние между точечными элементами ТО.

Выбор значения данного параметра представляет из себя поиск компромисса между точностью преобразования рабочих снимков системы и трудозатратами при расчете поправочных коэффициентов: чем меньше шаг сетки, тем больше калибруемых элементов возможно получить и тем точнее преобразование, при этом происходит значительное увеличение требуемых временных

и мощностных ресурсов ЭВМ. Также при превышении порогового значения «кучности» элементов возможно проявление влияния дифракции и превращение сетки элементов в однообразный фон, неразличимый для программного обеспечения. Таким образом, для проверки было выбрано три соотношения шага сетки и размера элемента.

Для хроматической дифференциации функциональных элементов было решено использовать следующую схему: синие калибровочные элементы на черном фоне, желтое центральное перекрестие и красная центральная точка.

Наиболее оптимальным размером калибровочного элемента является  $3 \times 3$  пикс, это обусловлено формой субпикселей – соотношение сторон излучающих площадок примерно равно  $1 : 3$ , поэтому фигура  $3 \times 3$  пикс максимально приближена к квадрату.

В создании экспериментального образца не представляется возможным использование специально разработанных деталей и узлов, дорогостоящих покупных комплектующих. В связи с этим собственная точность и точность позиционирования элементов экспериментального стенда априори ниже тех же параметров стенда рабочего.

Из всего вышесказанного следует справедливость жестких требований к элементам разрабатываемого стенда, которые можно разделить на следующие типы: оптические, электронные, оп-

Таблица 1 / Table 1

**Параметры трех вариантов тест-объектов**  
**Parameters of three variants of test objects**

Наименование параметра Parameter name	Тест-объект «А» Test object «A»	Тест-объект «В» Test object «B»	Тест-объект «С» Test object «C»
Разрешение, пикс Resolution, pix	1920 × 1200	1920 × 1200	1920 × 1200
Ширина центрального пере- крестия, пикс Width of central crosshair, pix	75 × 75	75 × 75	75 × 75
Толщина линий централь- ного перекрестия, пикс The thickness of the lines of the central crosshair, pix	5	5	5
Шаг сетки элементов, пикс Step grid elements, pix	4	8	12
Размер элементов, пикс size of elements, pix	1 × 1	2 × 2	3 × 3
Цвет центрального пере- крестия, RGB Color of the central crosshair, RGB	255; 255; 0	255; 255; 0	255; 255; 0
Цвет калибровочных элементов (центрального элемента), RGB* Color of calibration elements (central element), RGB*	0; 0; 255 (255; 0; 0)	0; 0; 255 (255; 0; 0)	0; 0; 255 (255; 0; 0)

\* коды в системе RGB: 255; 255; 0 – желтый; 0; 0; 255 – синий; 255; 0; 0 – красный

\* codes in the RGB system: 255; 255; 0 – yellow; 0; 0; 255 – blue; 255; 0; 0 – red

тико-электронные, механические. В качестве элек-  
тронного тест-объекта используется IPS матрица,  
параметры которой представлены в таблице 2. Вы-  
бор технологии IPS обусловлен формой субпиксе-  
лей (максимальное приближение к правильным  
равносторонним фигурам) и малыми, относитель-  
но других технологий (*PenTile*, *RealStripe* и др.),  
промежутками между активными площадками.

Согласно функции Эйри (прямая зависи-  
мость размера пятна рассеяния от длины волны  
излучения) рациональным будет использование  
элементов ТО синего цвета, однако многие ОЭП  
на установках ДЗЗ работают в инфракрасном  
спектральном диапазоне; для таких приборов  
требуется использование специальных излучаю-  
щих матриц и разработка специальных ТО. В на-  
стоящей работе разработка метода проводилась  
на основе ОЭП, работающего в видимом диапа-  
зоне.

В качестве системы регистрации был выбран  
фотоаппарат *CANON EOS 60D* со встроенным  
приемником в виде сенсора модели *APS-C CMOS*,  
технические характеристики которого представ-

Таблица 2 / Table 2

**Основные технические характеристики  
используемых матриц**  
**The main technical characteristics of the matrices used**

Наименование параметра Parameter name	Тип матрицы Type of matrix	
	IPS	APS-C CMOS
Диагональ активной площадки, мм Active site diagonal, mm	609,6	26,81
Разрешение, пикс Resolution, pix	1920 × 1080	5184 × 3456
Размер активных элементов, мкм Size of active elements, μm	70 × 24	4,3 × 4,3
Чувствительность (яркость) Sensitivity (brightness)	20..340 кд/м <sup>2</sup> cd/m <sup>2</sup>	100..6400 ISO
Тип фильтра Type of filter	RGB	RGBG
Динамический диапазон, evs Dynamic Range, evs	8,5	11,5

лены в таблице 2 [9], а в качестве тестируемых систем – фотообъективы *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* [10] и *CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II* [11].

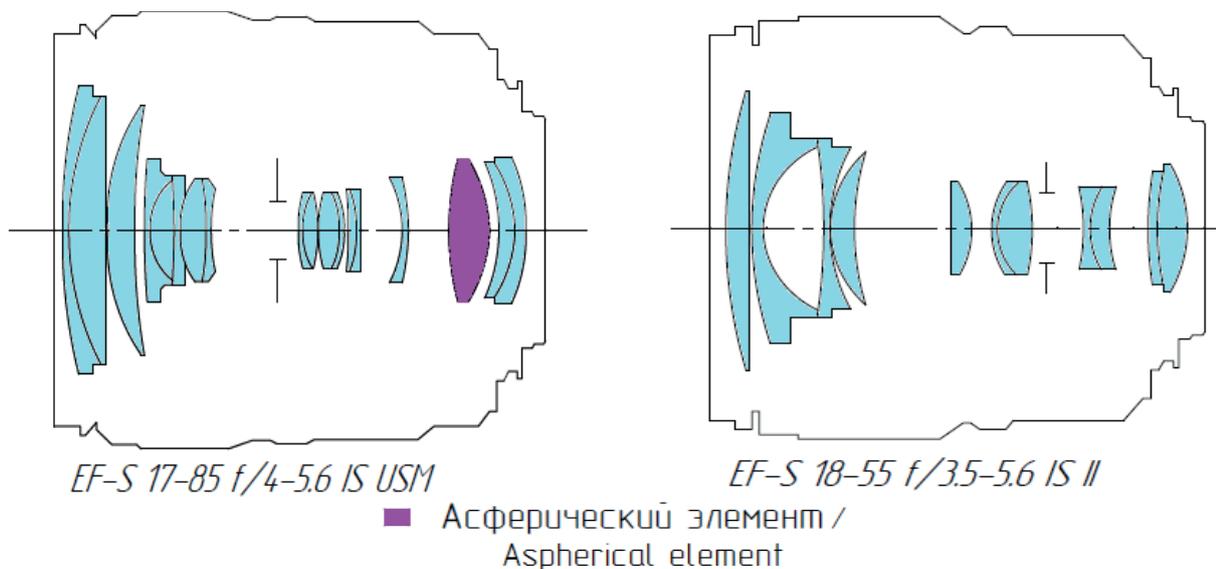
Выбор данной системы обусловлен следующими положениями:

1. Невозможность использования промышленных образцов высокоточных оптико-электронных приборов (ОЭП).

2. Необходимость минимизации погрешностей ориентации тестируемой оптической системы и приемного сенсора с возможностью замены тестируемых оптических систем (ОС) при сохранении допусков отклонений.

3. Возможность получения изображений без автоматического редактирования и цветокоррекции (формат *RAW*).

Использование двух объективов обусловлено возможностью относительной оценки чувствительности разрабатываемого метода – объективы со схожими параметрами одного производителя, при этом один из них (*CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM*) позиционируется как усовершенствованный – производитель заявляет о снижении влияния дисторсии за счет использования асферических элементов в оптической схеме (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Оптические системы фотообъективов *CANON EF-S: 17-85 f/4-5.6 IS USM* (слева) [10] и *18-55 f/3.5-5.6 IS II* (справа) [11]

**Figure 3** – Optical systems of photographic lenses *CANON EF-S: 17-85 f/4-5.6 IS USM* (left) [10] and *18-55 /3.5-5 6 IS II* (right) [11]

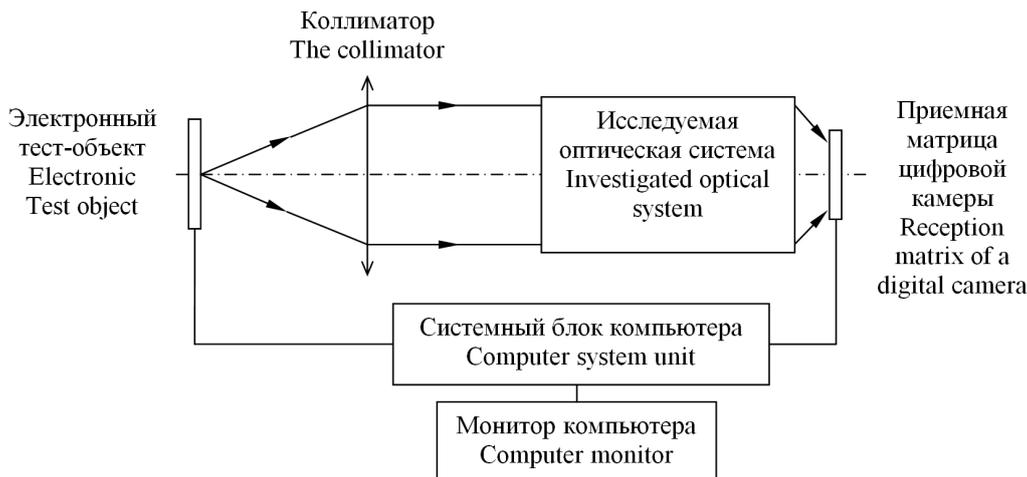
В ходе юстировки экспериментального и рабочего стендов (рисунок 4) также необходимо предусмотреть метод компенсации непараллельности тестируемого ОЭП и тест-объекта.

Экспериментальный макет был собран на базе оптической скамьи ОСК-2ЦЛ, включающей коллиматор (АЛ2.766.047, предел разрешения  $\psi \approx 0,96''$ , фокусное расстояние  $f' = 1600$  мм); столик с одним микрометрическим перемещением (АЛ6.124.086) для регистрирующей системы (РС); столик поворотный (АЛ6.124.084) для установки и юстировки положения ТО (погрешность отсчета 1'); РС в виде профессиональной цифровой камеры *CANON EOS 60D* [9]; исследуемая оптическая система в виде фотообъектива [10–11]; автоколлимационный окуляр с куб-призмой; материальный ТО (перекрестие в авто-

коллимационном окуляре) [12] для первичной юстировки регистрирующей системы; электронный ТО (*IPS*-матрица, планшет *Nexus 7*, таблица 2) для измерения дисторсии объектива; высокоточная плоскопараллельная пластинка ( $N = 0,5$ ;  $\Delta N = 0,05$ ; допуск на параллельность порядка 3") для выставления плоскостности по автоколлимационному блику; подключенный к РС системный блок компьютера для проведения юстировки и измерений.

### Проведение измерений

Перед началом измерений осуществлялась первичная юстировка цифровой камеры относительно коллиматора и последующая окончательная юстировка электронного ТО относительно коллиматора и цифровой камеры.



**Рисунок 4** – Функциональная схема экспериментального стенда

**Figure 4** – Functional diagram of the experimental stand

Первоначально осуществляется юстировка положения фотоаппарата с объективом, установленного на двух координатном столике, относительно коллиматора с автоколлимационным окуляром. На втором этапе вместо автоколлимационного окуляра в фокусе коллиматора устанавливается электронный ТО, ориентация которого производится по формируемому фотоаппаратом изображению (трансляция изображения на внешний монитор позволила добиться точности центрирования порядка 2 пикс). После проведения фотографирования была осуществлена замена объектива первой модели на вторую и весь процесс измерения был повторен. Таким образом было получено изображение ТО в плоскости фотоприемника РС (рисунок 5).

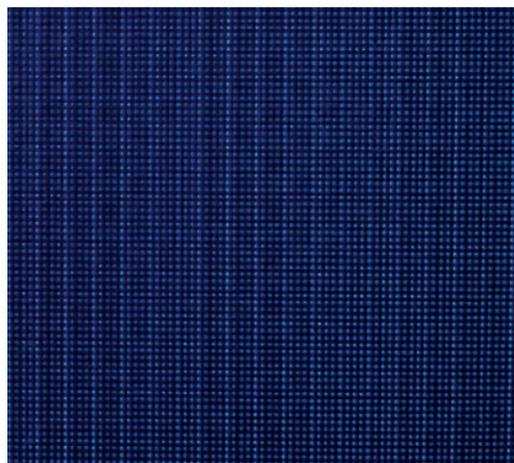


**Рисунок 5** – Изображение тест-объекта «С», полученное с объектива *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* размерностью  $22,3 \times 14,9$  мм

**Figure 5** – The image of the test object «C», received from the lens *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* dimensionality  $22.3 \times 14.9$  mm

В связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптиче-

ских поверхностях ТО с шагом сетки 4 и 8 пикс не могут обеспечить изображение, удовлетворяющее требованиям качества и разрешения – нарушается форма элементов, имеется значительное рассеяние (рисунок 6). Из этого следует, что анализировать имеет смысл лишь изображение ТО «С» с шагом сетки 12 пикс.



**Рисунок 6** – Фрагмент изображения тест-объекта «А», полученный с объектива *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* размерностью 1/6 кадра ( $3,7 \times 2,5$  мм)

**Figure 6** – Fragment of the image of the test object «A», received from the lens *CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM* dimensionality 1/6 of the frame ( $3.7 \times 2.5$  mm)

Из визуального анализа изображения на рисунке 5 становится очевидной положительная дисторсия в краевой зоне. Для оценки адекватности исполнения задачи кодом необходимо иметь сверочные данные по результатам измерения. Для этого проведем анализ полученного изображения в одной из сред графического моделирования

(Adobe Photoshop). В заложенных функциях присутствует операция измерения расстояния между двумя заданными точками в различных единицах (мм, пикс.). Выделим одно направление из центра изображения, соответствующее половинной диагонали (рисунок 7), так как максимальное значение дисторсии будет наблюдаться в углах (вызвано соотношением освещения матрицы оптической системой, наибольший угол  $\omega'$  приходится на край вписанного прямоугольника). Определив координаты калибровочных элементов, лежащих на вышеуказанном отрезке, рассчитаем относительную разницу координат.

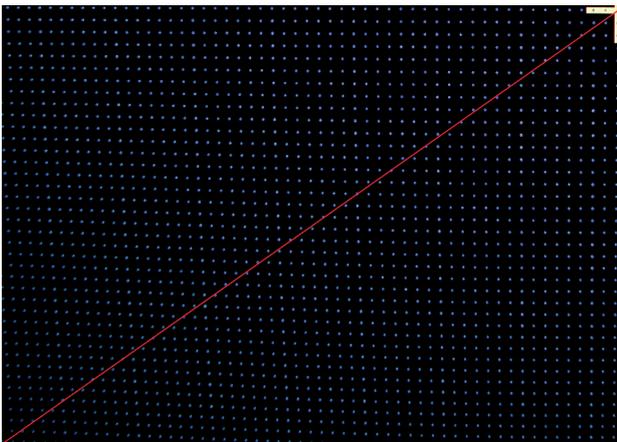


Рисунок 7 – Половинная диагональ формируемого изображения «С»

Figure 7 – Half of the diagonal of the formed image «C»

По полученным данным можно определить увеличение приращения координат элементов формируемого изображения (ФИ) с приближением к центру изображения – свидетельство наличия отрицательной («бочкообразной») дисторсии. В это же время флуктуация значений координат ТО обусловлена ошибкой оператора и периодической накапливаемой погрешностью, вызванной ориентацией сетки элементов (диагональ находится в иррациональной зависимости от декартовой системы координат). На основании полученных для 35 калибровочных элементов данных построены графики зависимости приращения координат от номера элемента (рисунок 8) с вычетом очевидных ошибок (очевидными считаются промахи с отличием от среднего значения в области больше 3 пикс, что обусловлено отклонениями  $\pm 1,5$  пикс для основного массива результатов). Из этих графиков прослеживается достаточно линейное снижение влияния дисторсии на изображения с удалением от краевой зоны. Так же можно подтвердить заявления изготовите-

ля о сниженном значении дисторсии в объективе CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM (рисунок 8a).

Проведя перерасчет значений дисторсии в метрическую систему получим данные для двух объективов. Так, для объектива «А» максимальное значение смещения изображения вследствие дисторсии равно 43 мкм, а для объектива «В» – 51,6 мкм.

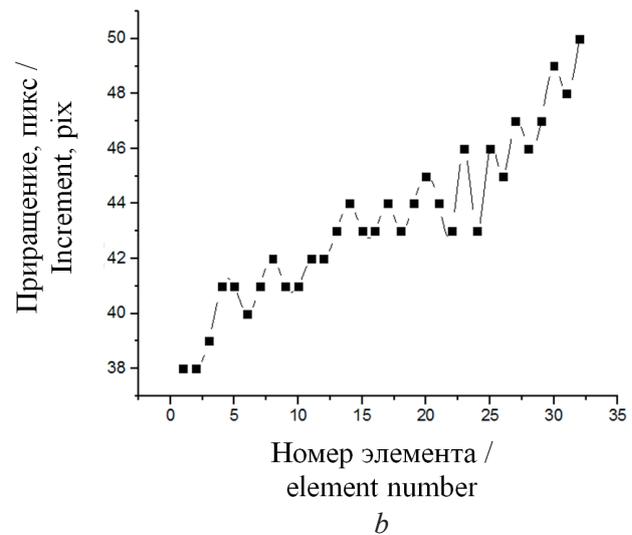
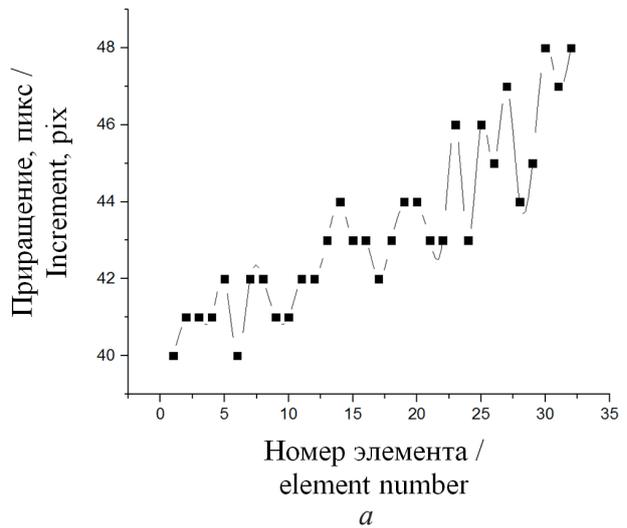


Рисунок 8 – Графики зависимости приращения координат от номера элемента для двух объективов: а – CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM; б – CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

Figure 8 – Graphs of the dependence of the increment of coordinates on the element number for two lenses: а – CANON EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM; б – CANON EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II

### Программная реализация

При создании алгоритма проведения расчета калибровочных коэффициентов, необходимо учесть следующие допущения:

– распределение пикселей и субпикселей по площади матрицы является равномерным;  
– форму калибровочных элементов считать квадратом;

– величина децентричности и взаимной непараллельности ТО и ОС считается пренебрежительно малой и не влияет на точность измерений.

С учетом указанных допущений предлагается следующий алгоритм программной реализации метода, визуальное представление которого приведено на рисунке 9:

1. Получение ФИ:

1.1 Фотографирование ТО исследуемым ОЭП;

1.2 Перенос и сохранение данных ФИ в памяти ЭВМ.

2. Декодирование исходного изображения (ИИ) на цифровой массив интенсивностей в *RGB* канале.

3. Задание центра координат для матрицы ФИ элементом (255, 0, 0) (красная точка).

4. Сканирование всех элементов ФИ по осям *x*, *y* с критерием поиска элементов от #000050 (0, 0, 80) до #0000FF (0, 0, 255).

5. Анализ массива значений интенсивности для определения кучностей активных элементов матрицы.

6. Получение набора точек *P* с известными координатами в системе *i;j* (ФИ).

7. Для каждой точки расчет значений радиус-вектора относительно центра оси (точка *p*(0,0)).

8. Задание центра координат для матрицы ФИ элементом (255, 0, 0).

9. Анализ ИИ и получение набора точек *P'* с известными координатами в системе *I;J* (ИИ), построение радиусов векторов относительно *p*(0,0).

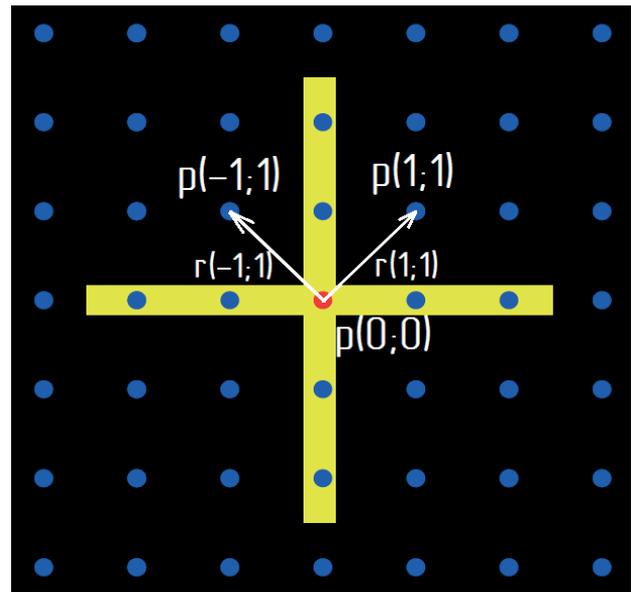
10. Приведение данных ИИ и ФИ к одному разрешению. Пропорционально сжать/расширить ИИ до ФИ по точкам, лежащим вблизи центра оси координат.

11. Получение набора точек *P'* с известными координатами в системе *I;J* (ИИ).

12. Для каждой точки расчет значений радиус-вектора от центра оси.

13. Сравнение радиус-вектора элементов, существующих для ИИ и ФИ (ФИ является изображением некоторой части ИИ  $\geq$  не для каждой *P* существует *P'*).

14. Перевод разницы длин радиус-векторов в метрическую систему в зависимости от параметров матрицы.



**Рисунок 9** – Модель определения координат калибровочных элементов: *p*(0;0) – центр координат; *p*(-1;1) и *p*(1;1) – точки калибровочных элементов в плоскости приемной матрицы; *r*(-1;1) и *r*(1;1) – радиус-векторы, соединяющие точки с центром координат

**Figure 9** – Model for determining the coordinates of the calibration elements: *p*(0;0) – center of coordinates; *p*(-1;1) and *p*(1;1) – the points of the calibration elements in the plane of the receiving matrix; *r*(-1;1) and *r*(1;1) – radius-vector connecting points with the center of coordinates

15. Вывод полученных данных через интерфейс программы для анализа оператором.

При программной реализации алгоритма целесообразно составить структуру (тело) кода из отдельных элементарных функций, которые представлены в большом числе специальных библиотек. На этом этапе следует определиться с языком программирования. После анализа самых распространенных языков было установлено, что больше других для решения данной задачи подходит «C++», так как работа с изображениями происходит посредством типовых функций, а библиотеки кодов подробны и доступны.

Таким образом, следует разбить алгоритм на типовые функции и выполнить их поиск:

- 1) определение координат пикселей по цвету;
- 2) определение длин радиус-векторов;
- 3) сравнение (расчет разности) длин радиус-векторов соответствующих элементов ТО и полученного изображения;
- 4) определение значения дисторсии исходя из геометрических параметров матрицы *PC*.

Серьезной проблемой видится совмещение разных блоков кода под одни параметры, так как высокая степень совмещения необходима для минимизации риска ошибки. Второй главной проблемой является быстроедействие – необходимо оценить 20 млн элементов, при этом параллельно выполнять действия над уже найденными.

В ходе поиска в онлайн-библиотеках были определены требуемые блоки кода, однако при совмещении переменных и попытках запуска была выявлена нестабильность результатов, при этом быстроедействие процессов являлась крайне низкой (не более 30 пикс/с, что при общем среднем объеме в 20 млн пикселей никаким образом не соответствует требованиям оперативности проведения измерений. В связи с этим становится очевидной необходимость пересмотра логики участка кода, отвечающего за определение координат пикселей искомого цвета, так как на эту операцию затрачивается основная часть времени. Оптимизация кода и расширение его функционала (учет децетрировки и непараллельности, реальной формы калибровочных элементов) видится авторам перспективным направлением дальнейшей работы.

## Заключение

Предложен метод геометрической калибровки оптико-электронных приборов, главными преимуществами которого являются высокая степень автоматизации процесса, универсальность и адаптивность применительно к исследуемым объектам, достигаемая за счет введения большого числа поправочных коэффициентов по всей плоскости изображения.

Достоинством метода является также возможность проведения ряда измерений с динамически изменяющимся рисунком тест-объекта и оценки предельного уровня контраста.

Разработана функциональная схема экспериментального контрольно-измерительного стенда на базе коллиматора и оптической скамьи ОСК-2ЦЛ. В ходе проведения измерений установлено, что тест-объекты с шагом сетки 4 и 8 пикс не могут обеспечить изображение удовлетворяющее требованиям качества и разрешения в связи с неколлимированным излучением активных площадок и рассеянием на оптических поверхностях – существенно нарушается форма элементов. Для анализа величины дисторсии наилучшим образом подходят тест-объекты с шагом сетки 12 пикс.

Для двух фотографических объективов Canon серии EF-S 17-85 f/4-5.6 IS USM и EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS II проведен расчет значений и оценка величины дисторсии в краевых зонах, которая соответственно составила 43 мкм и 51,6 мкм.

Разработан алгоритм программной реализации автоматического вывода поправочных коэффициентов. Задано направление развития метода, включающее оптимизацию программного обеспечения и дополнение его новыми функциями.

## Список использованных источников

1. Cramer, M. EUROSDR network on digital camera calibration / M. Cramer // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2004. – Vol. 35, Part B6. – P. 204–209.
2. Schuster, R. Calibration of the ADS40 airborne digital sensor / R. Schuster, B. Braunecker // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2000. – Vol. 33, Part B1. – P. 288–294.
3. Alharthy, A. Laboratory self-calibration of a multi-band sensor / A. Alharthy, J. Bethel // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 34, Part 3A. – P. 23–28.
4. Ежова, К.В. Математическое моделирование фотограмметрической дисторсии / К.В. Ежова // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – Вып. 26. – С. 235–239.
5. Комиссаров, Д.В. Методика калибровки цифровых неметрических камер для наземных лазерных сканеров / Д.В. Комиссаров, А.В. Комиссаров [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru/default>.
6. Кочкуров, С.А. Измерение и коррекция искажений изображения, вызванных дисторсией объектива сканера / С.А. Кочкуров [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа: <http://skochkurov.narod.ru/Distortion Paper.html>
7. Brown Duane C. The Bundle Adjustment – Progress and Prospects. XIII Congress of the International Society for Photogrammetry. Helsinki, 21 (3), 1976. – Melbourne (Florida – USA): DBA Systems, 1976. – 33 s., 12 obr. Signature: K39684.
8. Кульчицкий, А.А. Исследование моделей калибровки камер технического зрения для программной компенсации искажений в системах контроля геометрических параметров объектов / А.А. Кульчицкий // Инновационная наука. – 2015. – № 10. – С. 86–91.
9. Цифровые зеркальные камеры EOS и компактные системные камеры Canon EOS 60D [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: [https://www.canon.ru/for\\_home/product\\_finder/cameras/digital\\_slr/eos\\_60d/](https://www.canon.ru/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/).
10. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 17–85 mm f / 4–5,6 IS USM [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим

доступа: <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/>

11. Объектив EF-S Lenses Canon EF-S 18–55 mm f / 3,5–5,6 IS II. [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://www.canon.ru/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>

## References

1. Cramer M. EUROSDR network on digital camera calibration. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, vol. 35, part B6, pp. 204–209.

2. Schuster R., Braunecker B. Calibration of the ADS40 airborne digital sensor. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, vol. 33, part B1, pp. 288–294.

3. Alharthy A., Bethel J. Laboratory self-calibration of a multi-band sensor. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, vol. 34, part 3A, pp. 23–28.

4. Yezhova K.V. [Mathematical Modeling of Photogrammetric Distortion]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2006, vol. 26, pp. 235–239 (in Russian).

5. Komissarov D.V., Komissarov A.V. *Metodika kalibrovki cifrovyh nemetricheskikh kamer dlya nazemnykh lazernykh skanerov* [Method for calibrating digital non-metric cameras for ground-based laser scanners] Available at: <http://www.geoprofi.ru/default.asp?and B>, 1997, 295 p. (in Russian).

6. Kochkurov S.A. *Izmerenie i korrektsiya iskazhenii izobrazheniya, vyzvannykh distorsiei ob'ektiva skanera* [Measurement and correction of images caused by the distortion of the scanner lens]. Available at: <http://skochkurov.narod.ru/DistortionPaper.html> (in Russian).

7. Brown Duane C. The Bundle Adjustment – Progress and Prospects. XIII. Congress of the International Society for Photogrammetry. Helsinki, 21 (3), 1976, Melbourne (Florida – USA), DBA Systems, 1976, 33 s., 12 obr. Signature: K39684.

8. Kurkov V.M. [Methods of accounting for systematic aerial imaging]. Self-calibration «Izvestia VUZ» *Geodesy and aerial photography*, 1980, № 6, pp. 75–79 (in Russian).

9. Digital SLR cameras EOS and compact system cameras Canon EOS 60D. – 2017. Available at: [https://www.canon.com/for\\_home/product\\_finder/cameras/digital\\_slr/eos\\_60d/](https://www.canon.com/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_60d/)

10. Lens EF-S Lenses Canon EF-S 17–85 mm f / 4–5.6 IS USM. – 2017. Available at: <https://www.canon.com/lenses/ef-s-17-85mm-f-4-5-6-is-usm-lens/>.

11. Lens EF-S Lenses Canon EF-S 18–55 mm f / 3.5–5.6 IS II. – 2017. Available at: <https://www.canon.com/lenses/ef-s-18-55mm-f-3-5-5-6-is-ii-lens/>.

УДК 621.317.321:678.7

## Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокompозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина

Пантелеев К.В.<sup>1</sup>, Кравцевич А.В.<sup>2</sup>, Ровба И.А.<sup>2</sup>, Лысенко В.И.<sup>3</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения  
Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
пл. А. Тизенгауза, 7, г. Гродно 220013, Беларусь

<sup>3</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск 630090, Россия

Поступила 05.10.2017

Принята к печати 16.11.2017

В настоящее время для анализа однородности свойств материалов широкое распространение получают различные модификации сканирующего зонда Кельвина, позволяющие картировать пространственное распределение электростатического потенциала поверхности. В случае диэлектриков анализ однородности электропотенциального профиля не является достаточным для описания каких-либо конкретных физических параметров. Поэтому используется внешнее энергетическое воздействие, в частности оптическое излучение. Целью данной работы являлись модификация сканирующего зонда Кельвина и проведение экспериментальных исследований пространственного распределения электростатического потенциала актуальных композитных полимеров и его отклика на зондирующее воздействие оптическим излучением.

Исследования выполнены на опытных образцах композитов на основе полиэтилена высокого давления, наполненных углеродным наноматериалом и наночастицами диоксида кремния или алюминия. В результате исследования получены карты пространственного распределения относительных значений электростатического потенциала и поверхностной фото-ЭДС. Проведен статистический анализ однородности электрофизических и фотоэлектрических свойств композитов в зависимости от их компонентного состава. Также применительно к матричным полимерам сканирующий зонд Кельвина в совокупности с оптическим зондированием позволил обнаружить пьезоэлектрический эффект. Последнее может быть использовано в качестве основы для разработки новых методов исследования механических свойств матричных полимеров.

**Ключевые слова:** сканирующий зонд Кельвина, контактная разность потенциалов, электростатический потенциал, фото-ЭДС, полимерные нанокompозиты.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

**Адрес для переписки:**

Пантелеев К.В.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: nil\_pt@bntu.by

**Address for correspondence:**

Pantsialeveu K.U.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: nil\_pt@bntu.by

**Для цитирования:**

Пантелеев К.В., Кравцевич А.В., Ровба И.А., Лысенко В.И.,  
Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л.  
Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических  
свойств нанокompозитных полимеров модифицированным  
зондом Кельвина.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 386–397  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

**For citation:**

Pantsialeveu K.U., Krautsevich A.U., Rovba I.A., Lysenko V.I.,  
Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L.  
[Analysis of the electrophysical and photoelectric properties of  
nanocomposite polymers by the modified Kelvin probe].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 386–397 (in Russian)  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

# Analysis of the electrophysical and photoelectric properties of nanocomposite polymers by the modified Kelvin probe

Pantsialeu K.U.<sup>1</sup>, Krautsevich A.U.<sup>2</sup>, Rovba I.A.<sup>2</sup>, Lysenko V.I.<sup>3</sup>, Vorobey R.I.<sup>1</sup>, Gusev O.K.<sup>1</sup>, Zharin A.L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University,  
Nezavisimisty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

<sup>2</sup>Scientific and Research Center for Resource Saving,

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,  
A. Tizengauz sq., 7, Grodno 230023, Belarus

<sup>3</sup>Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Institutskaya str., 4/1, Novosibirsk 630090, Russia

Received 05.10.2017

Accepted for publication 16.11.2017

## Abstract

At present for analysis of the homogeneity of materials properties are becoming widely used various modifications of a scanning Kelvin probe. These methods allow mapping the spatial distribution of the electrostatic potential. Analysis of the electropotential profile is not sufficient to describe any specific physical parameters of the polymer nanocomposites. Therefore, we use an external energy impact, such as light. Purpose of paper is the modification of the Kelvin scanning probe and the conduct of experimental studies of the spatial distribution and response of the electrostatic potential of the actual polymer nanocomposites to the optical probing.

Carried out the investigations on experimental Low density polyethylene composites. Carbon nanomaterials and nanoparticles of silicon dioxide or aluminum as fillers are used. As a result, maps of the spatial distribution of the electrostatic potential relative values and the surface photovoltage. Statistical analysis of the electrophysical and photoelectric properties homogeneity, depending on the component composition of the composites carried out. In addition, with reference to matrix polymers, the Kelvin scanning probe, in combination with the optical probing, made it possible to detect a piezoelectric effect. The latter, can used as a basis for the development of new methods for studying the mechanical properties of matrix polymers.

**Keywords:** scanning Kelvin probe, contact potential difference, electrostatic potential, surface photovoltage, nanocomposite polymers.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

---

### Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: nil\_pt@bntu.by

### Address for correspondence:

Pantsialeu K.U.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: nil\_pt@bntu.by

### Для цитирования:

Пантелеев К.В., Кравцевич А.В., Ровба И.А., Лысенко В.И.,  
Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л.  
Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических  
свойств нанокомпозитных полимеров модифицированным  
зондом Кельвина.

Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 386–397.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

### For citation:

Pantsialeu K.U., Krautsevich A.U., Rovba I.A., Lysenko V.I.,  
Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L.  
[Analysis of the electrophysical and photoelectric properties of  
nanocomposite polymers by the modified Kelvin probe].

*Devices and Methods of Measurements.*  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 386–397 (in Russian)

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-386-397

## Введение

В настоящее время широкое распространение получают различные модификации сканирующего зонда Кельвина, позволяющие получать карты пространственного распределения электростатического потенциала поверхностей материалов с микрометровым пространственным разрешением [1, 2]. Высокая чувствительность электростатического потенциала к каким-либо изменениям состояния поверхности позволяет использовать данный параметр для выявления неоднородностей свойств материалов, часто не разрешаемых прочими методами физического материаловедения.

Традиционно зонд Кельвина используют для контроля состояния прецизионных поверхностей металлов, сплавов, полупроводниковых материалов и объектов по параметрам пространственного распределения работы выхода электрона [3], измеряемой по контактной разности потенциалов (КРП) относительно зондового образца. В то же время анализ литературных данных [4–6], а также проведенные ранее исследования [7] показывают, что методы КРП, в частности такие модификации, как сканирующий Кельвин-зондовый силовой микроскоп и сканирующий зонд Кельвина, применимы и к твердым диэлектрикам. В отличие от металлов и сплавов электростатический потенциал диэлектрика будет обусловлен собственными и/или приобретенными в результате внешних воздействий зарядами. На практике прямой анализ однородности электропотенциального профиля не является достаточно информативным для описания каких-либо конкретных физических параметров [7, 8]. Во-первых, в измерениях участвует весь объем диэлектрика, а не его поверхность, как в случае металлов. Во-вторых, неоднозначны факторы, приводящие к изменению электронной подсистемы диэлектрика. Поэтому в случае полимеров наиболее информативно использование методов КРП в совокупности с каким-либо внешним энергетическим воздействием, например, при осаждении зарядов в коронном разряде или оптическом зондировании поверхности [9]. Для анализа электронных явлений и процессов, имеющих место в полимерных композиционных материалах (ПКМ), особый интерес представляет световое воздействие, позволяющее зондировать строго определенные энергетические состояния электронов [10, 11]. Несмотря на высокую актуальность, исследова-

ния в данном направлении практически не проводятся.

Целью данной работы являлись модификация сканирующего зонда Кельвина и проведение экспериментальных исследований пространственного распределения электростатического потенциала актуальных композитных полимеров и его отклика на зондирующее воздействие оптическим излучением.

## Приборы и методы измерения

Исследование закономерностей формирования электропотенциального профиля и фотостимулированного изменения электронной подсистемы ПКМ проводили на разработанной специализированной сканирующей установке. Установка оснащена датчиком определения электростатического потенциала и источником оптического зондирования. Основные технические характеристики установки представлены в таблице 1.

Сканирующая система построена на основе трех приводов линейного перемещения, ориентированных по взаимно ортогональным направлениям ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Два привода обеспечивают горизонтальное перемещение по меандру заземленного держателя с закрепленным на нем образцом. Образец фиксируется на держателе с помощью вакуумного прижима. Третий привод обеспечивает вертикальное перемещение системы из измерителя КРП и источника видимого оптического излучения.

Измеритель КРП (рисунок 1) реализован по традиционному методу Кельвина–Зисмана [12, 13]. Поверхности эталонного (зондового)  $M_1$  и измеряемого  $M_2$  (закреплен на заземленном предметном столике) образцов формируют обкладки плоскопараллельного конденсатора. Зондовый образец приводится в возвратно-поступательное движение с помощью электромеханического вибратора 1 (частота модуляции 300 Гц). Вследствие периодического изменения расстояния между обкладками емкость динамического конденсатора периодически изменяется, что вызывает появление в измерительной цепи переменного сигнала. Предварительный усилитель (блок-схема В) выполнен на базе инструментального усилителя по схеме преобразователя ток–напряжение. Усиленный сигнал с предварительного усилителя поступает на вход фазового детектора (блок-схема С). Далее выпрямленное напряжение

Таблица 1 / Table 1

**Основные технические характеристики сканирующей установки**  
**Main technical characteristics of the scanning device**

Параметр / Parameters	Показатель / Characteristics
Датчик определения электростатического потенциала Electrostatic potential probe	Измеритель контактной разности потенциалов по методу Кельвина–Зисмана Kelvin–Zisman contact potential difference probe
Диаметр датчика определения электростатического потенциала, мм Diameter of the electrostatic potential probe, mm	1
Погрешность определения потенциала поверхности, мВ Error of surface potential measurement, mV	± 2
Система позиционирования Positioning system	3-координатная на базе шаговых двигателей 3 axis on the stepper motor driver
Точность позиционирования, мкм Positioning accuracy, μm	± 5
Пространственная разрешающая способность, мкм Spatial resolution, μm	10
Область сканирования, мм Scanning area, mm	180 × 180
Диапазон длин волн оптического излучения, нм Wavelength range of the optical radiation, nm	400–900
Диапазон измерения поверхностной фото-ЭДС, мВ Range of surface photovoltage measurement, mV	± 2

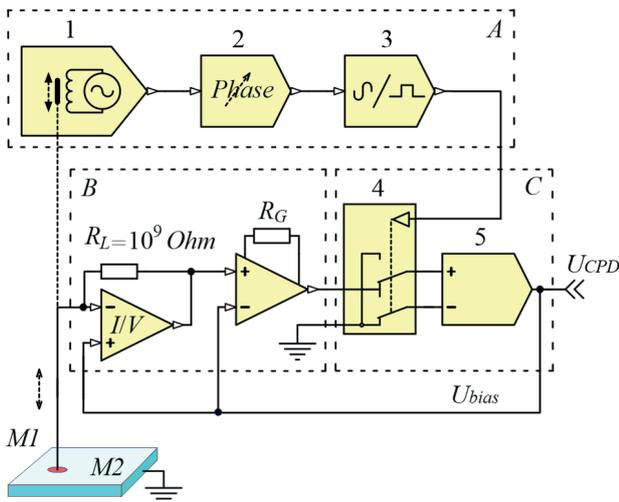
через интегратор 5 подается на не инвертирующий вход предусилителя для компенсации КРП  $U_{CPD}$ , тем самым обеспечивается замкнутая цепь автоматической автокомпенсации измеряемой величины. Таким образом, измеритель непрерывно отслеживает изменение КРП между эталонным и измеряемым образцами по фазе сигнала. Типовое использование измерителей включает подачу выходного напряжения, равного КРП, на вход аналогового или цифрового регистратора и дальнейшего сбора, и обработки измерительных данных. Как правило, в качестве регистрирующего устройства используется персональный компьютер, оснащенный платами управления процессами сканирования, сбора и обработки измерительных данных, однако могут использоваться и простейшие аналоговые (самописец) или цифровые (*DataLogger*) регистраторы.

Работа измерителя КРП в режиме сканирования поверхности (сканирующий зонд Кельвина) позволяет визуализировать пространственное

распределение электростатического потенциала, определяемого по КРП относительно зондового образца. Разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина в общем случае определяется геометрическими размерами чувствительного элемента измерительного преобразователя и может достигать уровня атомно-силовой микроскопии [14, 15].

### Материалы

Исследования выполнены на опытных образцах ПКМ на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 12203-250, промышленно выпускаемом заводом «Полимир» ОАО «Нафтан». Данная марка ПЭВД характеризуется наиболее высоким индексом текучести расплава (25 г/10 мин), поэтому главным образом применяется для получения концентратов красителей, т.е. высоконаполненных полимерных систем. Для получения композитов в качестве наполнителей



**Рисунок 1** – Структурная схема измерителя контактной разности потенциалов:  $M_1$ ,  $M_2$  – поверхности зонда и контролируемого образца соответственно;  $A$  – блок-схема модулятора (1 – вибратор, 2 – фазосдвигатель, 3 – формирователь сигнала);  $B$  – блок-схема предусилителя (преобразователь ток-напряжение, образованный операционным усилителем с высокоомным резистором  $R_L$ );  $C$  – блок-схема фазового детектора-интегратора (4 – электронный ключ, 5 – интегратор);  $U_{CPD}$  – сигнал контактной разности потенциалов;  $U_{bias}$  – напряжение компенсации [13]

**Figure 1** – Structure diagram of contact potential difference probes:  $M_1$ ,  $M_2$  – surfaces of the probe and sample respectively;  $A$  – flowchart of the modulator (1 – vibrator, 2 – phase shifter, 3 – convertor);  $B$  – flowchart of the preamplifier (current-voltage converter are formed by an operational amplifier with a high value resistor  $R_L$ );  $C$  – flowchart of the phase detector-integrator (Lock-In, 4 – analog switch, 5 – integrator);  $U_{CPD}$  – contact potential difference;  $U_{bias}$  – compensating voltage [13]

использованы углеродный наноматериал (УНМ), наночастицы диоксида кремния или алюминия. УНМ представляет собой продукт пиролиза углеродсодержащих газов в каталитическом кипящем слое, получаемый в лаборатории дисперсных систем Института тепло- и массообмена НАН Беларуси. Синтезируемый материал представляет сильно переплетенные между собой многостенные углеродные нанотрубки диаметром 10–20 нм (95 %) и примеси металлических частиц катализатора (до 5 %). Удельная поверхность УНМ, измеренная по методу BET составляет 113,5 м<sup>2</sup>/г. УНМ характеризуется высокой электропроводностью, поэтому может использоваться в качестве внутреннего антистатика высокоомных материалов. Наночастицы диоксида кремния и алюминия получены методом испарения с помощью

промышленного ускорителя электронов непрерывного действия в Институте теоретической и прикладной механики им. С.С. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск). Диаметр наночастиц диоксида кремния 25 нм, удельная поверхность по методу BET – 100–120 м<sup>2</sup>/г; диаметр наночастиц алюминия – 90–110 нм.

Композиционные полимеры изготавливали методом смешения в растворе с воздействием ультразвукового поля. Данный метод в отличие от наиболее распространенного метода смешения в расплаве позволяет получать композиты с более равномерным распределением дисперсной фазы. Для этого в колбу со шлифом помещали навески гранулята ПЭВД и наполнителя, в качестве растворителя использовали толуол. Колбу помещали в ультразвуковую ванну *BANDELIN Sonorex super RK 100 Н* (мощность 80 Вт, рабочая частота 35 кГц), оснащенную нагревателем. С целью устранения газообразных потерь растворителя в шлиф колбы вставляли обратный холодильник. Растворение полимера проводили при температуре 70–80 °С в течение 1 ч, после чего раствор полимера с суспендированными в нем частицами наполнителя подвергали ультразвуковому воздействию в течение 30 мин. Удаление растворителя из образцов происходило при сушке в термостате при 40 °С в течение суток. В результате были получены композиционные образцы, содержащие одновременно несколько видов наномодификаторов – гибридный наполнитель (таблица 2).

## Результаты и их обсуждение

Учитывая, что в процессе производства, транспортирования и хранения полимерных образцов возможна неконтролируемая статическая электризация, перед измерением проводилась предварительная подготовка образцов, включающая кондиционирование образцов в изопропиловом спирте в течении 14 ч и последующую нормализацию в лабораторных условиях в течение 6 ч.

Методика измерения включает следующее. После установки зонда над поверхностью измеряемого образца, закрепленного на заземленном предметном столике, производится отсчет и запоминание значения КРП  $U_{CPD}$ . Затем на участок поверхности под зондом воздействуют оптическим излучением. По достижении установившегося значения КРП источник оптического излучения отключается. Результат измерения сохраняется

Таблица 2 / Table 2

**Условные обозначения и компонентный состав опытных образцов**  
**Accepted designation and component composition of experimental samples**

№ образца No. of sample	Компонентный состав Component composition
1	97 мас. % полиэтилена высокого давления (ПЭВД), 2 мас. % углеродного наноматериала (УНМ), 1 мас. % наноразмерный диоксид кремния (SiO <sub>2</sub> ) 97 wt. % Low Density Polyethylene (PELD), 2 wt. % Carbon Nanomaterial (CNM), 1 wt. % Nano-sized Silica (SiO <sub>2</sub> )
2	94 мас. % ПЭВД, 4 мас. % УНМ, 2 мас. % SiO <sub>2</sub> 94 wt. % PELD, 4 wt. % CNM, 2 wt. % SiO <sub>2</sub>
3	91 мас. % ПЭВД, 6 мас. % УНМ, 3 мас. % SiO <sub>2</sub> 91 wt. % PELD, 6 wt. % CNM, 3 wt. % SiO <sub>2</sub>
4	97 мас. % ПЭВД, 2 мас. % УНМ, 1 мас. % наноразмерный алюминий (Al) 97 wt. % PELD, 2 wt. % CNM, 1 wt. % Nano-sized Aluminum (Al)
5	94 мас. % ПЭВД, 4 мас. % УНМ, 2 мас. % Al 94 wt. % PELD, 4 wt. % CNM, 2 wt. % Al
6	91 мас. % ПЭВД, 6 мас. % УНМ, 3 мас. % Al 91 wt. % PELD, 6 wt. % CNM, 3 wt. % Al
7 (контрольный / control)	100 мас. % ПЭВД 100 wt. % PELD
8 (дополнительный / additional)	Вторичный ПЭВД / Recycled PELD

в памяти управляющего контроллера сканирующей установки. Далее осуществляется вычисление поверхностной фото-ЭДС ( $U_{SPV}$ ) как разности значений КРП до и после оптического воздействия. При этом регистрируемый сигнал позволяет получить информацию не только о значении, но и о знаке потенциала.

Обработка измерительных данных включает построение визуализированных двух- или трехмерных карт пространственного распределения КРП (электростатического потенциала) и поверхностной фото-ЭДС и последующую статистическую обработку, включающую построения гистограмм распределения, определения центра (математическое ожидание) и полуширины гистограммы распределения.

Из результатов картирования пространственного распределения электростатического потенциала композиционных полимеров (рисунок 2) и статистической обработки гистограмм распре-

деления (таблица 3) видно, что композиты № 1–3 (рисунок 2а–с), содержащие УНМ и наночастицы диоксида кремния, имеют более сглаженный градиент распределения от экстремумов относительных значений электростатического потенциала по сравнению с группой композитов № 4–6, содержащих УНМ и наночастицы алюминия (рисунок 2д–ф). Наиболее однородное распределение в диапазоне относительных значений от –50 до –20 мВ (рисунок 2б) и от –80 до –56 мВ (рисунок 2д), а также минимальные значения центров распределения –22 и –56 мВ имеют образцы № 2 и 4 соответственно. Максимальные значения электростатического потенциала 70 и 180 мВ зарегистрированы у образцов № 3 и 6 соответственно. Последние характеризуются максимальным введением в полимерную матрицу наночастиц диоксида кремния или алюминия. В случае образца № 3 центры распределения по основной площади и области с максимумом

составили 24 и 50 мВ соответственно, а для образца № 6 – 158 и 60 мВ. Локальные экстремумы могут характеризовать области скопления дефектов, причем с характерными размерами последних вплоть до единиц нанометров. Однако, как отмечалось ранее, в измерениях

электростатического потенциала диэлектрика участвует как поверхность, так и его объем. Поэтому определение типа и глубины залегания дефекта является крайне затруднительным при отсутствии априорной информации о природе заряда.

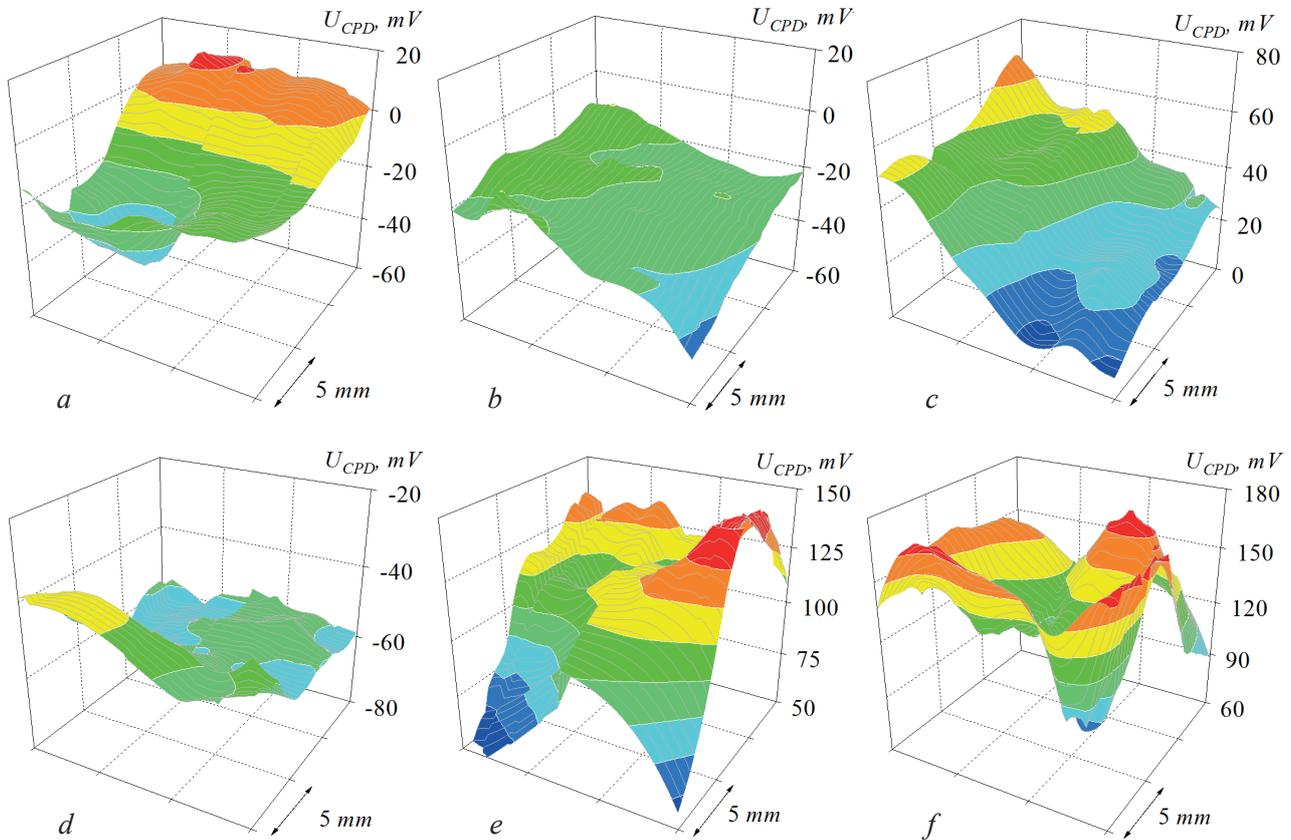


Рисунок 2 – Электропотенциальные изображения экспериментальных образцов: *a–f* соответствует образцам № 1–6  
Figure 2 – Electric potential images of the experimental samples: *a–f* are samples No. 1–6 respectively

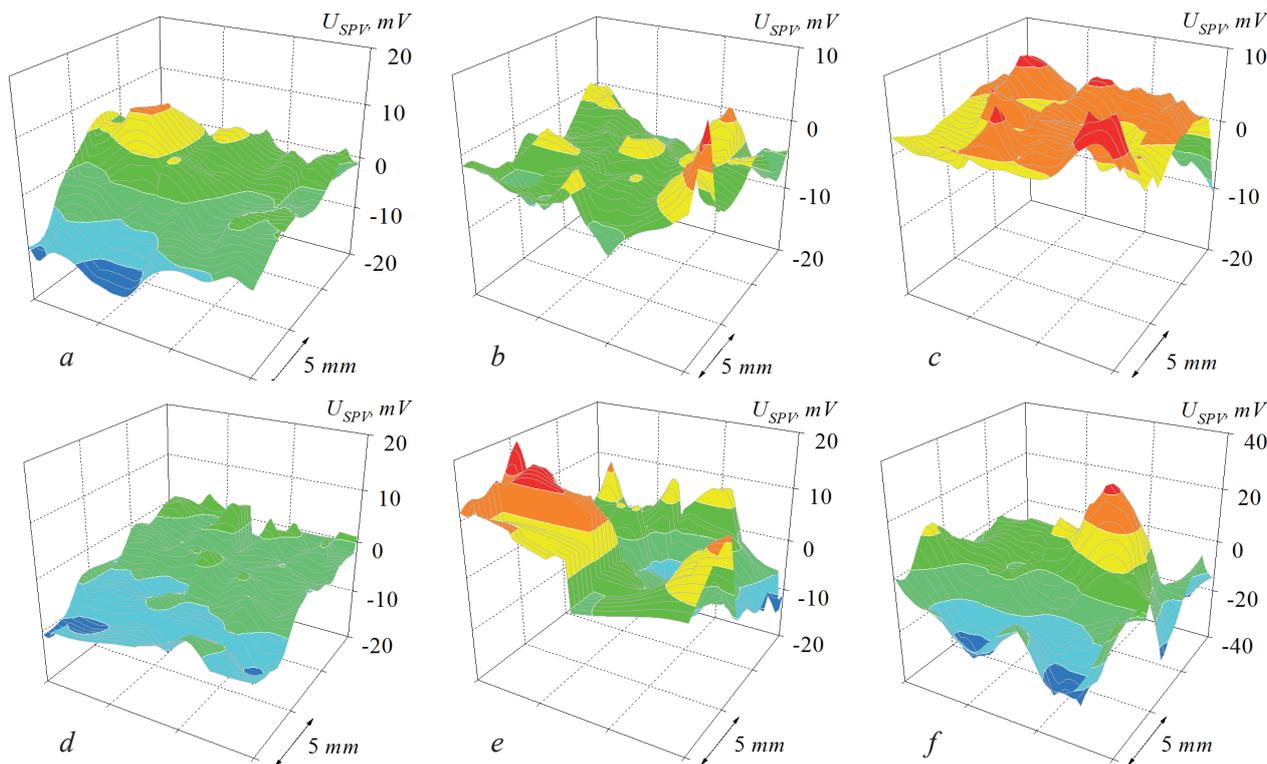
Таблица 3 / Table 3

Статистическая обработка результатов измерения электростатического потенциала  
Statistics of measurement results of electrostatic potential

№ образца No. of sample	Математическое ожидание электростатического потенциала $U_{CPD}$ , мВ Mathematical expectation of the electrostatic potential $U_{CPD}$ , mV		Полуширина гистограммы распределения электростатического потенциала $\Delta U_{CPD}$ , мВ Half-width histogram of the electrostatic potential distribution $\Delta U_{CPD}$ , mV	
	Основная площадь Main area	Локальный экстремум Local extremum	Основная площадь Main area	Локальный экстремум Local extremum
	1	8	-40	14
2	-22	-50	6	1
3	24	50	15	12
4	-56	-39	7	1
5	125	150	11	5
6	158	60	30	6
7	0	-240	10	2
8	48	348	10	12

Основным наблюдаемым эффектом при картировании поверхностной фото-ЭДС (рисунок 3) является мозаичный характер распределения положительных и отрицательных потенциалов. При этом, как следует из результатов статистической обработки (таблица 4), образцы № 4 и 5 (рисунок 3*d, e*), содержащие в относительно умеренной концентрации наночастицы алюминия, имеют нейтральный суммарный потенциал.

У образцов № 1 и 2 (рисунок 3*a, b*), содержащих наночастицы диоксида кремния, оптическое воздействие вызывает сдвиг потенциала в сторону положительных значений, а у образцов № 3 и 6 (рисунок 3*c, f*), характеризующихся максимальной концентрацией наполнителей, – в сторону отрицательных. В общем случае интегральное значение фото-ЭДС тем выше, чем выше концентрация наполнителя.



**Рисунок 3** – Карты распределения поверхностной фото-ЭДС экспериментальных образцов: *a–f* соответствует образцам № 1–6

**Figure 3** – Maps of the surface photovoltage of experimental samples: *a–f* are samples No. 1–6 respectively

Таблица 4 / Table 4

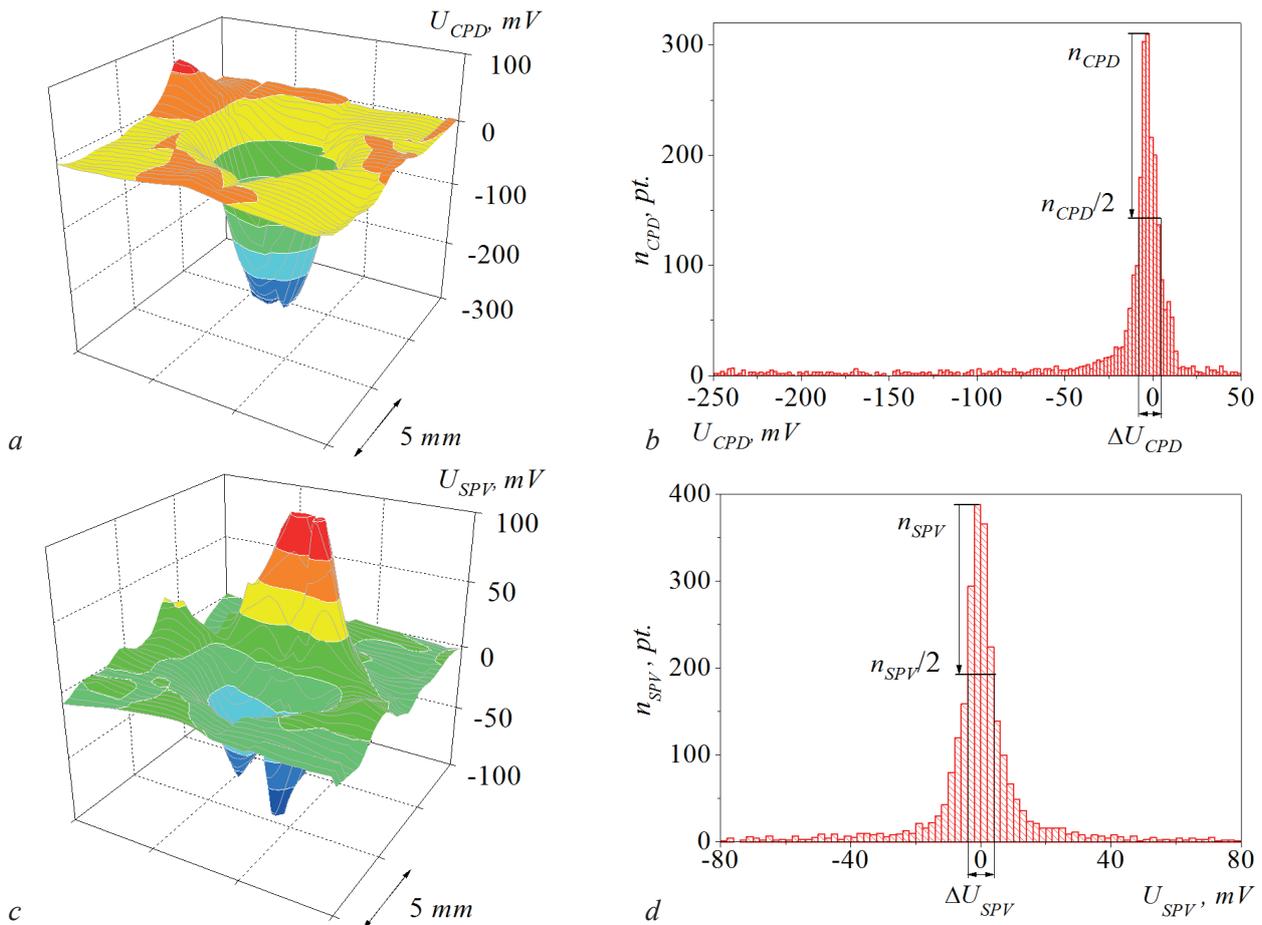
**Статистическая обработка результатов измерения поверхностной фото-ЭДС**  
**Statistics of measurement results of surface photovoltage**

№ образца No. of sample	Математическое ожидание поверхностной фото-ЭДС $U_{SPV}$ , мВ Mathematical expectation of the surface photovoltage $U_{SPV}$ , mV		Полуширина гистограммы распределения поверхностной фото-ЭДС $\Delta U_{SPV}$ , мВ Half-width histogram of the surface photovoltage distribution $\Delta U_{SPV}$ , mV	
	Основная площадь Main area	Локальный экстремум Local extremum	Основная площадь Main area	Локальный экстремум Local extremum
	1	-1	-15	9
2	-3	8	4	4
3	3	-10	6	6
4	0	-8	1	5
5	0	20	13	2
6	9	25	36	13
7	-1	-60; 80	8	5; 2
8	0	-70; 104	12	8; 2

Фотоэлектрическую однородность характеризует не только численное значение поверхностной фото-ЭДС, но в значительной степени ее относительные изменения по поверхности. Идентично анализу электропотенциального профиля наиболее однородное распределение фото-ЭДС имеют образцы композитов № 1–3, наполненные наночастицами диоксида кремния (рисунок 3а–с). Из группы композитов, содержащих в качестве наполнителя алюминий, наиболее однородное распределение поверхностной фото-ЭДС имеет образец № 4 (рисунок 3d). Увеличение значений поверхностной фото-ЭДС в отдельных областях свидетельствует о большой плотности заполнения поверхностных состояний, связанными, по всей видимости, с дефектами поверхностного слоя, непосредственно участвующего в оптическом зондировании. Учитывая последнее, обращает на себя внимание то, что в ряде случаев экстремумы поверхностной фото-ЭДС и электростатического потенциала расположены в одной

локальной области и имеют одну полярность, как, например, в случае образцов № 1 и 6 (рисунки 2 и 3), в других случаях полярность противоположна, например в случае образца № 4. Учитывая, что при оптическом зондировании стимулируются непосредственно электроны поверхностного слоя, данные характеристики могут быть использованы для разделения дефектов в объеме материала и поверхностном слое.

На рисунке 4 представлены результаты исследования контрольного образца 7, выполненного из ПЭВД. Из визуализированной карты (рисунок 4а) и гистограммы (рисунок 4b) распределения электростатических потенциалов видно, что практически по всей площади образца распределение однородно в пределах относительных значений от  $-8$  до  $+2$  мВ и центром распределения  $-4$  мВ. В центральной части образца выявлен максимум с относительным значением электростатического потенциала  $-300$  мВ. Также локальные максимумы в центральной части об-



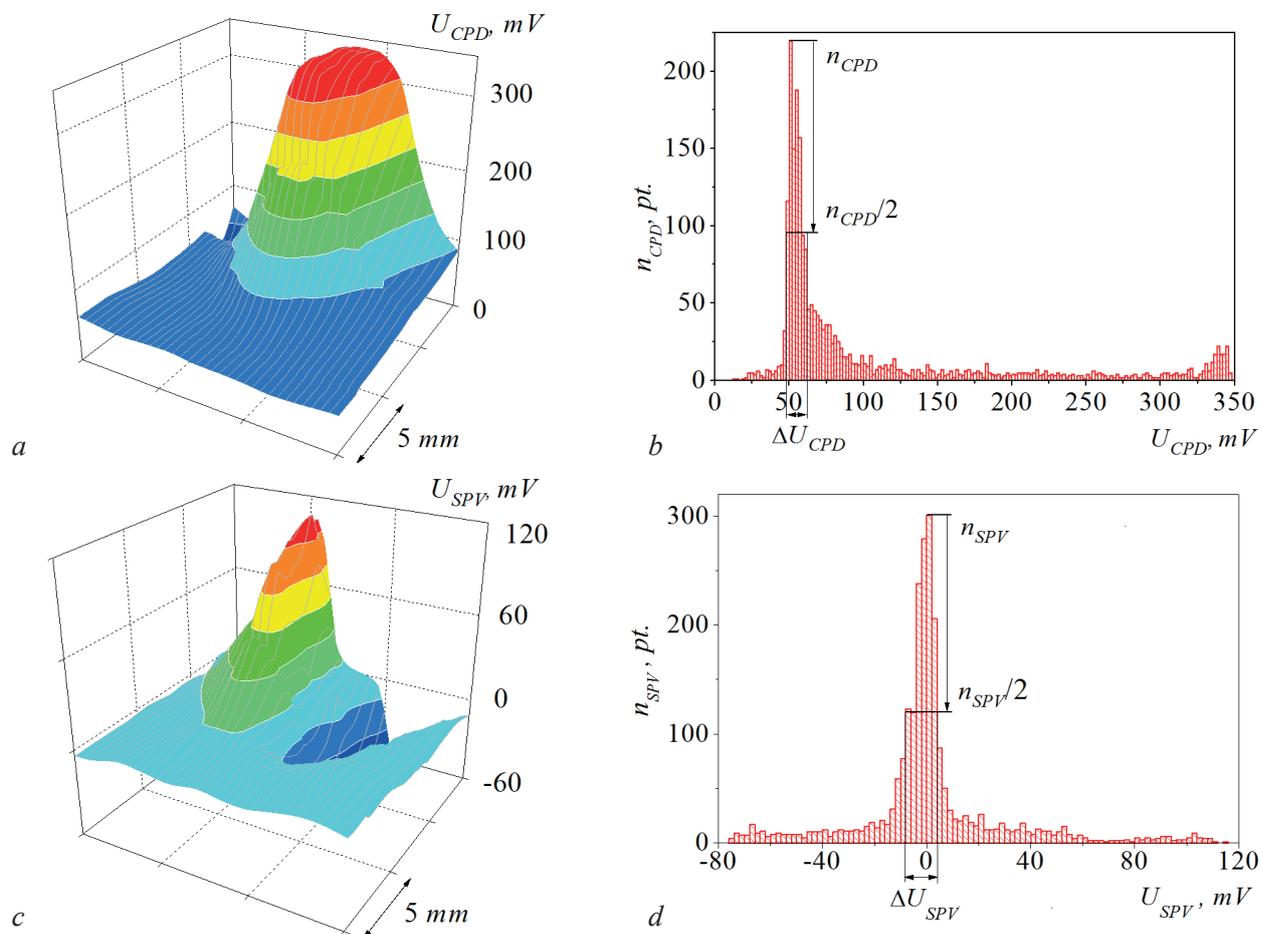
**Рисунок 4** – Карты и гистограммы пространственного распределения электростатического потенциала  $U_{CPD}$ , (a, b) и поверхностной фото-ЭДС  $U_{SPV}$  (c, d) по площади образца № 7 (полиэтилен высокого давления)

**Figure 4** – Maps and histograms of the electrostatic potential  $U_{CPD}$  (a, b) and surface photovoltage  $U_{SPV}$  (c, d) distribution over the area of sample No. 7 (Low-Density Polyethylene)

разца выявлены на карте распределения поверхностной фото-ЭДС (рисунок 4b), однако в этом случае максимумы имеют как отрицательное (–60 мВ), так и положительное (80 мВ) значения. Из гистограммы (рисунок 4с) видно, что фото-ЭДС распределена по основной площади образца также однородно в пределах от –3 до 3 мВ, математическое ожидание при этом составило 0. Наличие некомпенсированного объемного заряда хорошо объясняется с точки зрения пьезоэлектрического эффекта, который мог быть вызван давлением, создаваемым вакуумным прижимом, фиксирующим образец на предметном столике. Результаты сканирования контрольного образца № 7 без использо-

вания вакуумного прижима показали практически однородные распределения как электростатического потенциала, так и поверхностной фото-ЭДС, без наличия каких-либо «артефактов».

На образцах композиционных полимеров подобный эффект не наблюдался. Поэтому были проведены дополнительно измерения на матричном вторичном ПЭВД (образец № 8). Результаты измерений (рисунок 5) демонстрируют эффекты и характер распределения электростатического потенциала и поверхностной фото-ЭДС, аналогичные распределениям на образце матричного ПЭВД (№ 7, рисунок 4), за исключением численных значений и полярности экстремума (таблицы 3).



**Рисунок 5** – Карты и гистограммы пространственного распределения электростатического потенциала  $U_{CPD}$  (a, b) и поверхностной фото-ЭДС  $U_{SPV}$  (c, d) по площади образца № 8 (вторичный полиэтилен высокого давления)

**Figure 5** – Maps and histograms of the electrostatic potential  $U_{CPD}$  (a, b) and surface photovoltage  $U_{SPV}$  (c, d) distribution over the area of sample No. 8 (Recycled Low-Density Polyethylene)

С точки зрения контроля однородности свойств диэлектрических материалов и объектов наблюдаемый эффект следует рассматривать как нежелательный, поскольку приводит к перераспределению зарядов и смешиванию дефектной и бездефектной структур материала. С другой стороны,

отклик электростатического потенциала, а также фото-ЭДС на изменение внутренних напряжений может характеризовать и пьезоэлектрические свойства диэлектрических материалов, что на практике представляет высокий самостоятельный интерес.

## Заключение

Применительно к матричным полимерам сканирующий зонд Кельвина в совокупности с зондирующим воздействием оптическим излучением позволяет обнаруживать пьезоэлектрический эффект, что может быть использовано в качестве основы для разработки и создания новых методов и методик исследования деформаций, внутренних напряжений и других механических свойств полимерных материалов.

Анализ карт пространственного распределения электростатического потенциала и поверхностной фото-ЭДС показал, что относительные значения и однородность распределения зависят от компонентного состава и концентрации наполнителя измеряемых образцов. Количественная характеристика однородности электрофизических и фотоэлектрических свойств полимерных композитов может быть получена на основе построения и обработки гистограмм распределения электростатического потенциала и поверхностной фото-ЭДС.

Увеличение значений поверхностной фото-ЭДС в отдельных областях свидетельствует о большой плотности заполнения поверхностных состояний, связанных, по всей видимости, с дефектами в поверхностном слое, участвующем в оптическом зондировании. Поэтому использование дополнительного оптического воздействия, по всей вероятности, позволяет не только определять и визуализировать распределение поверхностной фото-ЭДС, но и разделять неоднородности свойств объема материала и его поверхности.

## Список использованных источников

1. *Subrahmanyam, A.* The Kelvin Probe for Surface Engineering: Fundamentals and Design / A. Subrahmanyam, S. Kumar. – USA : CRC Press, 2010. – 200 p.
2. *Zharkikh, Yu.S.* Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method / Yu.S. Zharkikh, S.V. Lysochenko // Applied Surface Science. 2017. – Vol. 400. – P. 71–76.
3. Kelvin probe force microscopy and its application / W. Melitz, J. Shen, A.C. Kummel, S. Lee // Surface Science Reports. – 2011. – Vol. 66. – P. 1–27.  
**doi:** 10.1016/j.surfrep.2010.10.001
4. *Noras, M.A.* Charge detection methods for dielectrics – Overview / M.A. Noras // Trek Application Note. – 2003. – No. 3005. – P. 1–13.
5. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics /

A. Galembeck, C.A.R. Costa, M.C.V.M. da Silva, E.F. Souza, F. Galembeck // Polymer. – 2001. – Vol. 42. – P. 4845–4851.

**doi:** 10.1016 / S0032-3861 (00) 00921-6

6. The mosaic of Surface Charge in Contact Electrification / H.T. Baytekin, A.Z. Patashinski, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B.A. Grzybowski // Science. – 2011. – Vol. 333. – P. 308–312.

**doi:** 10.1126 / science.1201512

7. Влияние высокодисперсного наполнителя на адгезионные и фрикционные свойства сополимера этилена с винилацетатом / А.И. Свириденко, А.Л. Жарин, А.В. Кравцевич, А.К. Тявловский // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 4. – С. 401–410.

8. *Ebrahimi, G.* Investigation on corrosion protection mechanism of polyaniline nanoparticles doped with phosphoric acid by scanning Kelvin probe and other electrochemical methods / G. Ebrahimi, F. Rezaei, J. Neshati // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. – 2016. – P. 1–10.

**doi:** 10.1016/j.jtice.2016.11.007

9. *Schroder, D.* Surface voltage and surface photovoltage: history, theory and applications / D. Schroder // Measurement Science & Technology. – 2001. – Vol. 3. – No. 12. – P. R16–R31.

10. *Davies, D.K.* Charge generation of dielectric surfaces / D.K. Davies // Journal of Physics. D: Applied Physics. – 1969. – No. 2. – P. 1533–1537.

**doi:** 10.1088/0022-3727/2/11/307

11. *Vorobey, R.I.* Controlling the characteristics of photovoltaic cell based on their own semiconductors / R.I. Vorobey, [at al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – No. 8. – P. 81–85.

**doi:** 10.15199/48.2016.08.52

12. *Zisman, W.A.* A new method of measuring contact potential differences in metals / W. A. Zisman // Review of Scientific Instruments. – 1932. – No. 3. – P. 367–370.

**doi:** 10.1063/1.1748947

13. *Пантелеев, К.В.* Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.

**doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

14. *Wicinski, M.* Lateral resolution in scanning Kelvin probe microscopy / M. Wicinski, W. Burgstaller, A.W. Hassel // Corrosion Science. – 2016. – Vol. 104. – P. 1–8. **doi:** 10.1016/j.corsci.2015.09.008

15. Multitip scanning bio-Kelvin probe / I.D. Baikie, P.J.S. Smith, D.M. Porterfield, P.J. Estrup // Review of Scientific Instruments. – 1999. – Iss. 70.

**doi:** 10.1063/1.1149678

## References

1. Subrahmanyam A., Kumar S. The Kelvin Probe for Surface Engineering: Fundamentals and Design. USA, CRC Press, 2010, 200 p.

2. Zharkikh Yu.S., Lysochenko S.V. Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 400, pp. 71–76.
3. Melitz W., Shen J., Kummel A.C., Lee S. Kelvin probe force microscopy and its application. *Surface Science Reports*, 2011, vol. 66, pp. 1–27. **doi**: 10.1016/j.surfrep.2010.10.001
4. Noras M.A. Charge detection methods for dielectrics – Overview. *Trek Application Note*, 2003, no. 3005, pp. 1–13.
5. Galembeck A., Costa C.A.R., Silva M.C.V.M., Souza E.F., Galembeck F. Scanning electric potential microscopy imaging of polymers: electrical charge distribution in dielectrics. *Polymer*, 2001, vol. 42, pp. 4845–4851. **doi**: 10.1016/S0032-3861(00)00921-6
6. Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A. The mosaic of Surface Charge in Contact Electrification. *Science*, 2011, vol. 333, pp. 308–312. **doi**: 10.1126/science.1201512
7. Sviridenok A.I., Krautsevich A.U., Zharin A.L., Tyavlovsky A.K. The effect of high-dispersion fillers on adhesive and frictional properties of Ethylene-Vinyl Acetate copolymer. *Journal of Friction and Wear*, 2014, iss. 35, no. 4, pp. 255–262.
8. Ebrahimi G., Rezaei F., Neshati J. Investigation on corrosion protection mechanism of polyaniline nanoparticles doped with phosphoric acid by scanning Kelvin probe and other electrochemical methods. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, pp. 1–10. **doi**: 10.1016/j.jtice.2016.11.007
9. Schroder D. Surface voltage and surface photovoltage: history, theory and applications. *Measurement Science & Technology*, 2001, vol. 3, no. 12, pp. R16–R31.
10. Davies D.K. Charge generation of dielectric surfaces. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, 1969, no. 2, pp. 1533–1537. **doi**: 10.1088/0022-3727/2/11/307
11. Vorobey R.I. Gusev O.K. Tyavlovsky A.K., Svistun A.I., Shadurskaja L., Yarzhembiyskaja N., Kerczynski K. Controlling the characteristics of photovoltaic cell based on their own semiconductors. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, no. 8, pp. 81–85. **doi**: 10.15199/48.2016.08.52
12. Zisman W.A. A new method of measuring contact potential differences in metals. *Review of Scientific Instruments*, 1932, no. 3, pp. 367–370. **doi**: 10.1063/1.1748947
13. Pantsialeyeu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L. [Design of the contact potentials difference probes]. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, no. 1, vol. 7, pp. 7–15 (in Russian). **doi** : 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15
14. Wicinski M., Burgstaller W., Hassel A. W. Lateral resolution in scanning Kelvin probe microscopy. *Corrosion Science*, 2016, vol. 104, pp. 1–8. **doi**: 10.1016/j.corsci.2015.09.008
15. Baikie I.D., Smith P.J S., Porterfield D.M., Estrup P.J. Multitip scanning bio-Kelvin probe. *Review of Scientific Instruments*, 1999, iss. 70. **doi**: 10.1063/1.1149678

УДК 658.516:006.063

## Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта

Должанский А.М., Бондаренко О.А., Петлёванный Е.А.

Национальная металлургическая академия Украины,  
пр. Гагарина, 4, г. Днепр 49005, Украина

Поступила 27.10.2017

Принята к печати 28.11.2017

Качество объектов обычно оценивают соответствующим комплексным показателем. Он формируется единичными показателями качества с их коэффициентами значимости. Свертку соответствующих зависимостей представляют средними взвешенными величинами: арифметической, геометрической, гармонической, квадратической и др. При этом заранее неизвестным является влияние вида свертки на уровень комплексного показателя качества, стабильность результатов расчета и достоверность сопоставления качества сходных объектов. Поэтому целью исследования являлась оценка влияния вида среднего взвешенного на уровень и стабильность результатов расчета комплексного показателя качества при сравнении различных объектов.

Для типичных частных объектов сопоставили рассчитанные значения комплексного показателя качества с использованием формул указанных средних взвешенных оценок. При этом учли значимости соответствующих единичных показателей качества, показатель неполноты описания объекта и влияние на объект управляющих факторов.

Результаты расчетов получили с применением планирования виртуального эксперимента. Они показали, что уровень и стабильность комплексного показателя качества существенно зависят от вида свертки. В результате выявили, что при выборе лучшего представителя из соответствующего класса объектов целесообразно пользоваться средней арифметической взвешенной оценкой.

Полученные данные могут служить основой при выборе вида среднего взвешенного при оценке качества разнообразных объектов и принятии решений о рациональных уровнях управляемых факторов.

**Ключевые слова:** квалиметрия, показатели качества объекта, средние взвешенные оценки.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

---

**Адрес для переписки:**

Бондаренко О.А.  
Национальная металлургическая академия Украины,  
пр. Гагарина, 4, г. Днепр 49005, Украина  
e-mail: sana105@i.ua

**Address for correspondence:**

Bondarenko O.A.  
National Metallurgical Academy of Ukraine,  
Gagarin Ave., 4, Dnepr 49005, Ukraine  
e-mail: sana105@i.ua

**Для цитирования:**

Должанский А.М., Бондаренко О.А., Петлёванный Е.А.  
Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 398–407  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

**For citation:**

Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Petlyovaniy Ye.A.  
[Influence of the average weighted estimation type on the dependence of the complex quality index on the parameters of object].  
Devices and Methods of Measurements.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 398–407 (in Russian)  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

# Influence of the average weighted estimation type on the dependence of the complex quality index on the parameters of object

Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Petlyovaniy Ye.A.

National Metallurgical Academy of Ukraine,  
Gagarin Ave., 4, Dnepr 49005, Ukraine

Received 27.10.2017

Accepted for publication 28.11.2017

## Abstract

Objects quality is usually assessed by a complex indicator. It includes single quality indicators with their significance factors. The convolution of the corresponding dependencies represents average weighted quantities: arithmetic, geometric, harmonic, quadratic, etc. At the same time, the influence of the convolution type on the level of the complex quality index, the stability of the calculation results and, the reliability of the quality comparison among a number of similar objects is unknown in advance. Therefore, the aim of the study was to assess the influence of the average weighted type on the level and stability of the calculating results of the complex quality index in different objects compressing.

For typical private objects compared the values of the complex quality index calculated according to the formulas of various average weighted estimates. Significance of the corresponding unit quality indicators, incompleteness of the object description and control factors influence on the object took into account.

The results of the research were got using the method of virtual experiment planning. They showed that the influencing parameters changes, the calculated levels and stability of the complex quality index essentially depend on the type of convolution. It was shown that under the priori uncertainty of the necessary convolution for the best representative choosing of the corresponding class of objects, the arithmetic average weighted estimate is the best for using.

The obtained data can serve as a basis for an informed choice of the type of average weighted in the quality assessment of various objects and decision-making on rational levels of controlled factors.

**Keywords:** qualimetry, quality indicators, average weighted assessment.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

---

### Адрес для переписки:

Бондаренко О.А.  
Национальная металлургическая академия Украины,  
пр. Гагарина, 4, г. Днепр 49005, Украина  
e-mail: sana105@i.ua

### Address for correspondence:

Bondarenko O.A.  
National Metallurgical Academy of Ukraine,  
Gagarin Ave., 4, Dnepr 49005, Ukraine  
e-mail: sana105@i.ua

### Для цитирования:

Должанский А.М., Бондаренко О.А., Петлёваный Е.А.  
Влияние вида средней взвешенной оценки на зависимость комплексного показателя качества от параметров объекта.  
Приборы и методы измерений.  
2017. – Т. 8, № 4. С. 398–407  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

### For citation:

Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Petlyovaniy Ye.A.  
[Influence of the average weighted estimation type on the dependence of the complex quality index on the parameters of object].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2017, vol. 8, no. 4, pp. 399–408 (in Russian)  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-398-407

## Введение

Количественную оценку качества продукции, процессов и систем обычно осуществляют с помощью единичных показателей качества с их коэффициентами значимости и комплексного показателя качества. Определение последнего при необходимости сопоставительного оценивания качественных характеристик объектов обычно сводится к расчету одной из средневзвешенных оценок: арифметической, гармонической, геометрической, квадратической и др. [1].

При этом часто априори не удается обосновать выбор вида среднего взвешенного, который в пределах определенной системы экспертного оценивания содержит существенную субъективную составляющую, как по номенклатуре единичных показателей качества, так и по их значимости. Поэтому может снизиться достоверность определения качества объектов не только из-за рассчитанного уровня индивидуальных значений комплексного показателя качества сравниваемых объектов, но и из-за стабильности результатов расчетов.

Сложность общего решения задачи неизмеримо увеличивается в связи с неопределенностью функциональных связей между единичными показателями качества и управляемыми факторами, а также возможным наличием взаимных связей между последними, что сопровождается проявлением нелинейности.

Вследствие этого общее решение задачи становится необозримо громоздким. Поэтому для анализа поведения подобных сложных систем применяют методы планирования виртуального (расчетного) эксперимента, например по ортогональным латинским квадратам [2], а обобщение решения может быть реализовано для классов типовых взаимосвязей (полиномиальных, степенных и др.) [3, 4].

Указанные особенности не нашли необходимого отражения в соответствующих исследованиях и методологии оценки качества объектов, что не позволяло определить рациональный уровень воздействий на технические, технологические и организационные параметры, которые в управляемом режиме и с учетом определенных ограничений должны обеспечить максимальное качество и соответствующую максимизацию комплексного показателя качества объекта.

Поэтому целью исследования являлась оценка влияния вида среднего взвешенного на уровень

и стабильность результатов расчета комплексного показателя качества при сравнении объектов, представленных типичными аналитическими моделями в зависимости от факторов, которые характеризуют эти объекты.

## Основная часть

При количественном оценивании объектов (систем, процессов, продукции и/или услуги) при решении задач, связанных с выбором лучшего представителя из аналогичного ряда, использовали комплексный показатель качества вида:

$$Q = f(y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n; k_1, k_2, \dots, k_n; n), \quad (1)$$

который формируется совокупностью  $n$  единичных показателей качества  $y_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) с их коэффициентами значимости  $k_i$ . При этом:

$$\sum_1^n k_i = k_1 + k_2 + \dots + k_n + u \equiv 1, \quad (2)$$

где  $u$  – показатель неполноты представления качества продукции, а вид функционала  $f$  определяется как форма одного из известных средних взвешенных: арифметическое, геометрическое, гармоническое, квадратическое или др. [5].

Перечень характерных  $y_i$  и соответствующие значения  $k_i$  могут быть определены, в частности, экспертными методами с учетом запросов потребителей (заказчиков), содержания нормативных документов (ДСТУ, ТУ, ISO и др.) и возможностей производителей. Общим требованием при этом является обеспечение возрастающей связи между  $y_i$  и  $Q$ . Желательным также является нормирование всех величин с их представлением в диапазоне 0–1.

Для решения поставленной задачи при комплексной оценке качества объекта использовали:

– величину среднего арифметического взвешенного:

$$Q_{arith} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (3)$$

часто применяемого из-за простоты расчетов, а также в связи с его формально линейной зависимостью от единичных показателей качества  $y_i$ . Использование является целесообразным, когда все  $y_i$  имеют одинаковую размерность, мало от-

личаются друг от друга и характеризуются существенно разными коэффициентами значимости  $k_i$ ;  
– величину среднего геометрического взвешенного:

$$Q_{geom.} = \left( \prod_{i=1}^n y_i^{k_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (4)$$

обычно применяемого в случаях, когда результат оценивания формируется как произведение составляющих, которые концентрируются в окрестности некоторого их среднего значения. Целесообразность использования  $Q_{geom}$  может быть обусловлена также тем, что соответствующая свертка (4) в силу специфики объекта должна приравнять его комплексную оценку качества нулю, если какой-либо из  $y_i = 0$ ;

– величину среднего гармонического взвешенного:

$$Q_{harm.} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{y_i}}, \quad (5)$$

которое занимает промежуточное положение между представленными выражениями (3) и (4). Эта характеристика, как и среднее геометрическое взвешенное, учитывает рассеивание единичных показателей в окрестности их среднего значения, и как среднее арифметическое взвешенное – возрастающие связи величин и является довольно простой при расчетах;

– величину среднего квадратического взвешенного:

$$Q_{quadr.} = \sqrt[n]{\frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot y_i^2}{\sum_{i=1}^n k_i}}, \quad (6)$$

которая также достаточно часто применяется при комплексном оценивании объектов, в частности в статистических расчетах.

Весьма важным с точки зрения управления процессами максимизации качества объекта является то, что, согласно данным работы [6], единичные показатели качества  $y_i$  могут быть представлены соответствующими функциями вида:

$$y_i = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_j, m), \quad (7)$$

а функционал (1) – соответствующей формулой:

$$Q = f(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{nm}; m; k_1, k_2, \dots, k_n; n), \quad (8)$$

где  $x_j$  – технические и/или технологические, и/или организационные «внешние» управляющие факторы при реализации объекта ( $1 \leq j \leq m$ ).

В результате появляется общая задача поиска необходимого уровня множества  $m$  факторов  $x_j$ , которые обеспечивают достоверный максимум  $Q_{max}$ , минуя явный учет значений  $y_i$ .

Поскольку общее решение задачи неосуществимо, оценку влияния вида среднего взвешенного на комплексный показатель качества, а также на выбор рациональных уровней  $x_j$ , при которых  $Q$  принимает наибольшие возможные значения, выполнили для типичных примеров.

При этом формулы (3)–(6) с учетом равенства (2) представили в виде:

$$Q_{arith.} = \sum_{i=1}^{n-1} (k_i \cdot y_i) + \bar{k} \cdot y_n; \quad (9)$$

$$Q_{geom.} = \left( \prod_{i=1}^{n-1} y_i^{k_i} \right) \cdot y_n^{\bar{k}}; \quad (10)$$

$$Q_{harm.} = \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^{n-1} k_i / y_i \right) + \bar{k} / y_n}; \quad (11)$$

$$Q_{quadr.} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (k_i \cdot y_i^2) + \bar{k} \cdot y_n^2}, \quad (12)$$

где коэффициент значимости при наименее важном  $y_n$  согласно (2) равняется:

$$\bar{k} = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} k_i - u. \quad (13)$$

Зависимости вида (7) для каждого конкретного случая могут быть найдены в ходе специальных исследований, например теоретически или путем экспериментального изучения соответствующих объектов с последующей аналитической аппроксимацией полученных результатов.

Поскольку в рамках достижения поставленной цели конкретизация объекта оценивания особого значения не имеет, для обобщения результатов анализа выбрали два типичных частных примера аналитических связей вида (7), которые ранее были отражены в работе [7]:

– изготовление стальной проволоки волочением;

– производство ферросиликомарганца.

На первом этапе для описания качества процесса волочения использовали нормиро-

ванные зависимости вида полиномов, которые отражают [7]:

– теоретическую относительную энергоэффективность процесса:

$$y_1 = U = \frac{0,667 \cdot \alpha}{(1 + \frac{0,08}{\alpha}) \cdot \varepsilon + 0,667 \cdot \alpha}; \quad (14)$$

– экспериментально найденный предел прочности проволоки, отнесенный к его максимальному значению (750 МПа):

$$y_2 = S = 0,508 + 0,514 \cdot \varepsilon^{0,643} + 0,14 \cdot \alpha^{1,237}; \quad (15)$$

– экспериментально найденное относительное удлинение готовой проволоки, нормированное на его максимальное значение (50 %):

$$y_3 = \Delta = \frac{1}{-2,786 + 9,53 \cdot \varepsilon^{0,542} + 5,01 \cdot \alpha^{0,4827}}; \quad (16)$$

где  $0,05 \leq x_1 = \varepsilon \leq 0,45$  – степень деформации металла (технологический фактор);  $0,05 \leq x_2 = \alpha \leq 0,45$  – половина угла конусности волоки (технический фактор).

Также приняли, что коэффициенты значимости  $x_3$  и  $x_4$  при единичных показателях качества  $y_1 = U$  и  $y_2 = S$  соответственно находятся

в диапазонах изменения:  $0,15 \leq x_3 = k_1 \leq 0,39$ ,  $0,15 \leq x_4 = k_2 \leq 0,39$ . При этом показатель неполноты описания объекта  $0 \leq x_5 = u \leq 0,1$ . Тогда из равенства (13) можно определить коэффициент значимости  $\bar{k}$  наименее важного (в рамках конкретной задачи) единичного показателя качества: в данном случае приняли, что это  $-y_3 = \Delta$  (16).

Использование выражений (9)–(16) позволяет для указанных диапазонов изменения пяти  $x_j$  определить значения  $Q$  и оценить влияние на последний параметр видов среднего взвешенного. Практично же такой анализ затруднителен, поскольку он требует рассмотрения многомерной (в данном случае 5-мерной) зависимости.

Для разрешения такой ситуации провели виртуальный (расчетный) эксперимент по плану ортогонального латинского квадрата. Порядок квадрата при этом выбрали равным количеству  $j = 5$  влияющих факторов  $x_j$  [7]. Соответствующим образом определили и количество уровней изменения этих факторов в принятом диапазоне:  $x_1 = \varepsilon$  от 0,05 до 0,45 с шагом 0,10;  $x_2 = \alpha$  от 0,05 до 0,45 с шагом 0,10;  $x_3 = k_1$  от 0,15 до 0,39 с шагом 0,06;  $x_4 = k_2$  от 0,15 до 0,39 с шагом 0,06;  $x_5 = u$  от 0 до 0,10 с шагом 0,025. Результаты расчетов  $Q_w$  отразили в матрице на рисунке 1.

0,623; 0,703; 0,735; 0,673/1	0,506; 0,482; 0,458; 0,529/2	0,374; 0,352; 0,317; 0,422/3	0,334; 0,292; 0,240; 0,430/4	0,324; 0,227; 0,101; 0,450/5
0,469; 0,469; 0,431; 0,518/6	0,306; 0,167; 0,080; 0,429/7	0,537; 0,576; 0,566; 0,587/8	0,401; 0,302; 0,245; 0,506/9	0,291; 0,327; 0,298; 0,354/10
0,397; 0,311; 0,253; 0,484/11	0,252; 0,234; 0,198; 0,353/12	0,426; 0,482; 0,465; 0,477/13	0,386; 0,248; 0,124; 0,485/14	0,605; 0,636; 0,637; 0,637/15
0,282; 0,244; 0,216; 0,369/16	0,338; 0,359; 0,315; 0,415/17	0,402; 0,281; 0,129; 0,508/18	0,623; 0,680; 0,698; 0,664/19	0,504; 0,452; 0,399; 0,547/20
0,283; 0,204; 0,108; 0,387/21	0,549; 0,569; 0,557; 0,588/22	0,340; 0,245; 0,196; 0,452/23	0,387; 0,436; 0,409; 0,440/24	0,434; 0,367; 0,302; 0,523/25

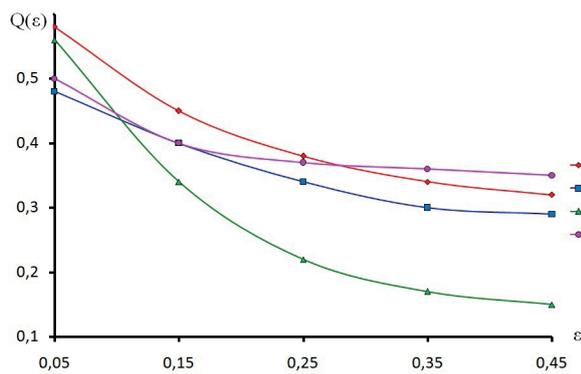
**Рисунок 1** – Матрица расчетных значений  $Q_w$  последовательно по формулам (9); (10); (11) и (12) для соответствующих  $w$ -ячеек (номер под косой чертой)

**Figure 1** – The matrix of the calculated values  $Q_w$  successively by formulas (9); (10); (11) and (12) for the corresponding  $w$ -cells (number under the slash)

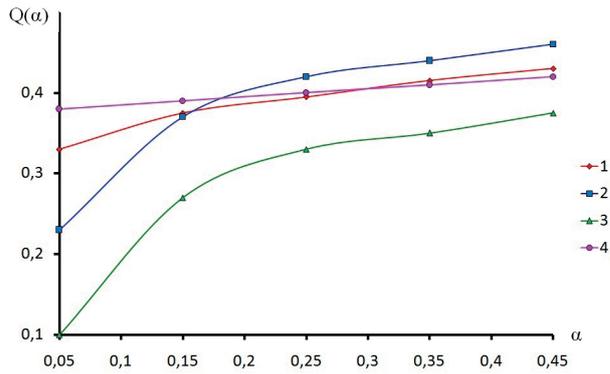
После логарифмирования значений  $Q_w$  для всех ячеек рисунка 1, усреднения логарифмов для каждого уровня каждой из указанных независимых переменных  $x_j$ , потенцирования полученного среднего значения (согласно [8]) получили

частные зависимости  $Q_g$  от каждой переменной (рисунок 2).

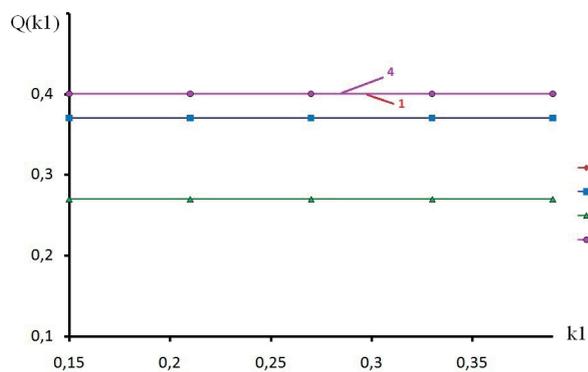
Каждая частная зависимость отражает качественную связь  $Q_g$  с соответствующей переменной, а количественная связь определяется од-



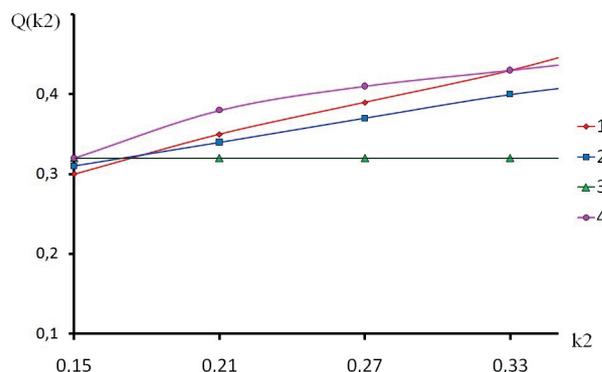
a



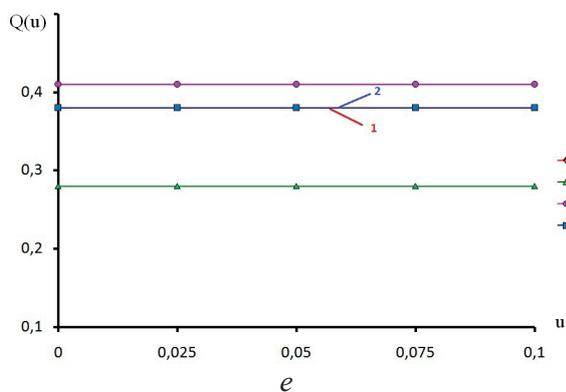
b



c



d



e

**Рисунок 2** – Частные зависимости  $Q_g$  комплексного показателя качества процесса волочения от независимых факторов:  $a - Q(\varepsilon)$ ;  $b - Q(\alpha)$ ;  $c - Q(k_1)$ ;  $d - Q(k_2)$ ;  $e - Q(u)$ ; при расчете по формулам: красная линия – (9); синяя – (10); зеленая – (11); розовая – (12)

**Figure 2** – Particular dependencies  $Q_g$  of the quality complex index while drawing process on independent factors:  $a - Q(\varepsilon)$ ;  $b - Q(\alpha)$ ;  $c - Q(k_1)$ ;  $d - Q(k_2)$ ;  $e - Q(u)$ ; by formulas: red line – (9); blue – (10); green – (11); pink – (12)

новременно всеми представленными частными зависимостями согласно выражению [9–11]:

$$Q = N \cdot \prod_{g=1}^G Q_g, \quad (17)$$

где  $Q_g$  – ординаты на графиках рисунка 2 для выбранных значений аргументов, а нормирующий коэффициент  $N$  находили по формуле:

$$N = \frac{\sum_{w=1}^W N(w)}{w}, \quad (18)$$

для которого значения  $N_w$  для каждой  $w$ -й ячейки квадрата определяли с учетом трендов линий на рисунке 2 и вычисляются по выражению:

$$N_w = \frac{Q_w}{\prod_{g=1}^G Q_{w(g)}}. \quad (19)$$

В качестве общего для всех результатов расчетов выбрали  $N = 47,34$ , полученное для среднего арифметического взвешенного. Остальные результаты привели к этому же значению путем коррекции соответствующих уровней расположения линий на рисунке 2.

Набор значений  $N_w$  позволил с учетом средней величины  $N$  оценить точность такой обработки данных путем вычисления их среднего квадратического отклонения (точнее, «стандарта отклонения») [10]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{w=1}^W (N - N_w)^2}{W - 1}} \quad (20)$$

и соответствующего коэффициента вариации:

$$\delta_b = \frac{\sigma}{N}. \quad (21)$$

Для вероятности  $p = 0,95$  ориентировочно приняли, что относительная ошибка представленной обработки данных:

$$\delta \approx 2 \cdot \delta_b. \quad (22)$$

В рассмотренном примере при использовании формулы (9) коэффициент вариации составил  $\delta_b(9) \approx 0,11$ ; для формулы (10)  $\delta_b(10) \approx 0,17$ ; для формулы (11)  $\delta_b(11) \approx 0,21$ ; для формулы (12)  $\delta_b(12) \approx 0,07$ .

Далее аналогичный анализ провели при расчете значений комплексного показателя качества процесса изготовления ферросиликомарганца с использованием функций вида (7) в форме произведения безразмерных параметров, нормированных к диапазону  $0 \leq y_i \leq 1$ , со степенями [7]:

$$y_1 = \eta = 0,90 \cdot I^{0,436} \cdot R^{-0,005} \cdot t^{0,453}; \quad (23)$$

$$y_2 = E = 0,82 \cdot I^{-0,019} \cdot R^{0,132} \cdot t^{-0,093}; \quad (24)$$

$$y_3 = P = 0,80 \cdot I^{1,852} \cdot R^{0,959} \cdot t^{-0,049}, \quad (25)$$

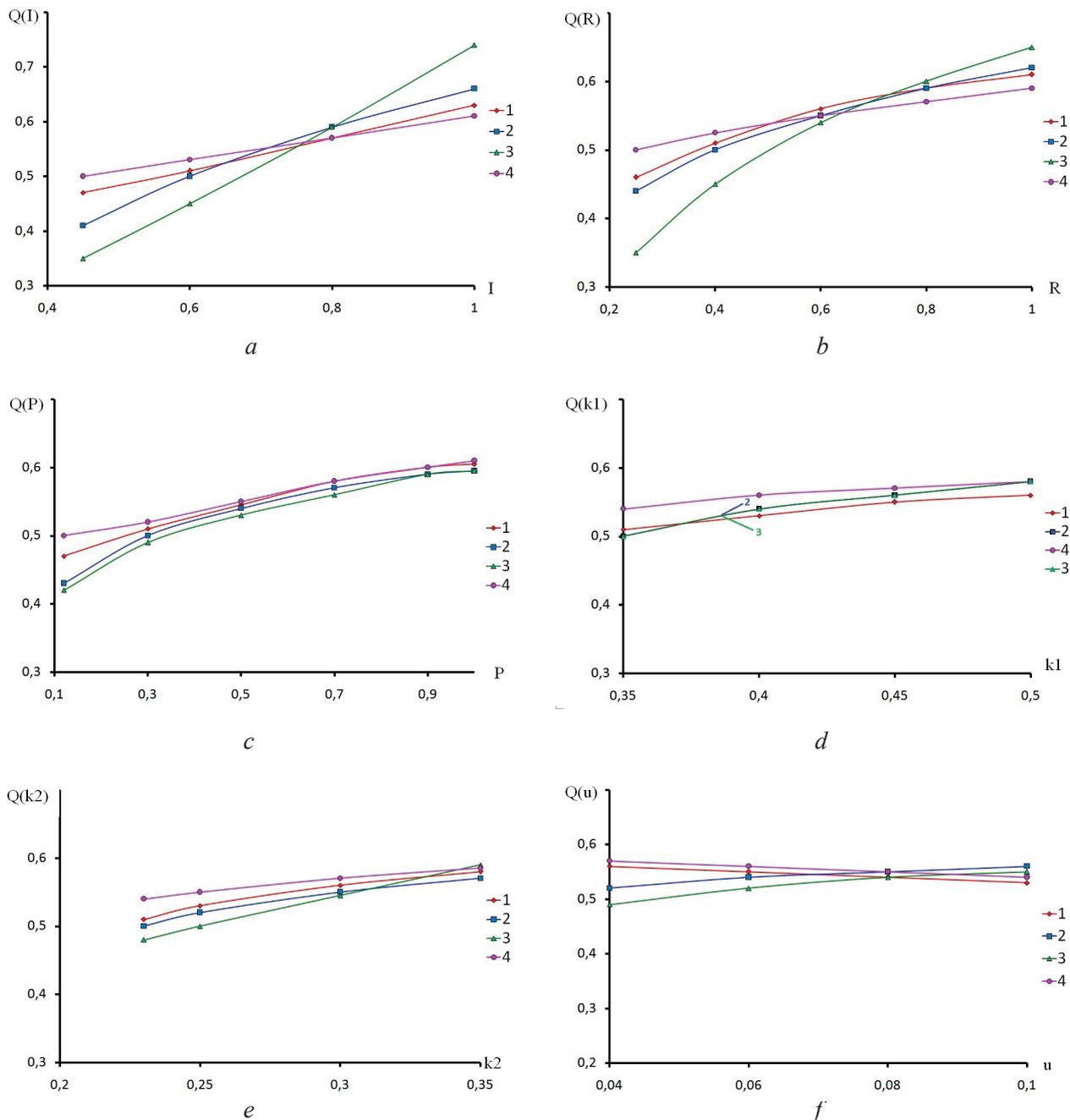
где  $\eta$  – интенсивность извлечения марганца;  $E$  – удельная экономия электроэнергии;  $P$  – производительность, зависящие от силы тока  $0,45 \leq x_1 = I \leq 1$ , активного электрического сопротивления  $0,25 \leq x_2 = R \leq 1$  и времени  $0,12 \leq x_3 = t \leq 1$  продолжительности процесса. При этом приняли коэффициенты значимости:  $0,35 \leq x_4 = k_1 \leq 0,50$ ;  $0,23 \leq x_5 = k_2 \leq 0,50$  при  $\eta$  и  $E$  соответственно, а также  $0,04 \leq x_6 = u \leq 0,10$  – показатель неполноты представления качества процесса, который согласно выражению (13) определит коэффициент значимости  $\bar{k}$  наименее важного (в рамках конкретной задачи) единичного показателя качества (в данном случае приняли, что это –  $y_3 = P$ ).

Для анализа влияния указанных шести независимых переменных на  $Q$  провели расчеты по плану одного из известных ортогональных латинских квадратов 7-го порядка [7]. Уровни указанных переменных, для которых проводили определение значений комплексного показателя качества по формулам (9)–(13) и (23)–(25), равны:  $x_1 = I$  от 0,45 до 1,00 с шагом 0,10;  $x_2 = R$  от 0,25 до 1,00 с шагом 0,13;  $x_3 = t$  от 0,12 до 1,00 с шагом 0,15;  $x_4 = k_1$  от 0,35 до 0,50 с шагом 0,025;  $x_5 = k_2$  от 0,23 до 0,35 с шагом 0,02;  $x_6 = u$  от 0,04 до 0,10 с шагом 0,01, а результаты расчетов  $Q_w$  для каждой  $w$ -й ячейки квадрата представлены на рисунке 3.

0,300; 0,193; 0,114; 0,431/1	0,387; 0,327; 0,239; 0,479/2	0,471; 0,456; 0,389; 0,538/3	0,558; 0,586; 0,560; 0,607/4	0,641; 0,702; 0,720; 0,680/5	0,714; 0,799; 0,854; 0,751/6	0,777; 0,875; 0,957; 0,820/7
0,521; 0,554; 0,474; 0,585/8	0,612; 0,609; 0,560; 0,651/9	0,626; 0,642; 0,620; 0,665/10	0,658; 0,696; 0,701; 0,896/11	0,607; 0,607; 0,560; 0,685/12	0,476; 0,499; 0,460; 0,533/13	0,441; 0,413; 0,270; 0,524/14
0,574; 0,605; 0,558; 0,638/15	0,510; 0,527; 0,481; 0,613/16	0,622; 0,628; 0,513; 0,667/17	0,549; 0,548; 0,487; 0,592/18	0,580; 0,605; 0,583; 0,621/19	0,486; 0,456; 0,320; 0,552/20	0,491; 0,474; 0,379; 0,569/21
0,565; 0,618; 0,625; 0,611/22	0,536; 0,562; 0,480; 0,591/23	0,547; 0,589; 0,549; 0,611/24	0,738; 0,775; 0,797; 0,754/25	0,539; 0,480; 0,341; 0,606/26	0,526; 0,518; 0,462; 0,598/27	0,478; 0,498; 0,475; 0,545/28
0,605; 0,517; 0,552; 0,660/29	0,632; 0,665; 0,639; 0,693/30	0,510; 0,542; 0,516; 0,585/31	0,433; 0,439; 0,368; 0,532/32	0,530; 0,517; 0,476; 0,588/33	0,574; 0,586; 0,564; 0,622/34	0,516; 0,469; 0,336; 0,584/35
0,570; 0,599; 0,594; 0,615/36	0,652; 0,710; 0,735; 0,686/37	0,518; 0,512; 0,426; 0,597/38	0,510; 0,542; 0,504; 0,574/39	0,490; 0,459; 0,296; 0,573/40	0,593; 0,544; 0,435; 0,655/41	0,474; 0,456; 0,417; 0,556/42
0,736; 0,784; 0,813; 0,756/43	0,546; 0,533; 0,456; 0,609/44	0,553; 0,505; 0,306; 0,615/45	0,449; 0,433; 0,369; 0,550/46	0,501; 0,526; 0,482; 0,576/47	0,510; 0,574; 0,573; 0,564/48	0,637; 0,665; 0,570; 0,661/49

**Рисунок 3** – Матрица расчетных значений  $Q_w$  последовательно для соответствующих  $w$ -ячеек квадрата по формулам (9)–(11) и (12) (номер под косой чертой)

**Figure 3** – The matrix of the calculated values  $Q_w$  successively by formulas (9)–(11) and (12) for the corresponding  $w$ -cells (number under the slash)



**Рисунок 4** – Частные зависимости комплексного показателя качества  $Q_g$  процесса производства ферросиликомарганца от независимых факторов:  $a - Q(I)$ ;  $b - Q(R)$ ;  $c - Q(P)$ ;  $d - Q(k_1)$ ;  $e - Q(k_2)$ ;  $f - Q(u)$ ; при расчете по формулам: красная линия – (9); синяя – (10); зеленая – (11); розовая – (12)

**Figure 4** – Particular dependences of the quality complex index  $Q_g$  while ferro-silicate-manganese production on independent factors:  $a - Q(I)$ ;  $b - Q(R)$ ;  $c - Q(P)$ ;  $d - Q(k_1)$ ;  $e - Q(k_2)$ ;  $f - Q(u)$ ; by formulas: red line – (9); blue – (10); green – (11); pink – (12)

После обработки значений  $Q_w$ , алгоритм которой описан выше, результат представили в виде (17), где  $N = 21,18$ , а частные зависимости  $Q_g$  от каждой переменной отражены на рисунке 3.

В этом примере при использовании формулы (9) коэффициент вариации составил

$\delta_b(9) \approx 0,05$ ; для формулы (10) –  $\delta_b(10) \approx 0,06$ ; для формулы (11) –  $\delta_b(11) \approx 0,077$ , для формулы (12) –  $\delta_b(12) \approx 0,09$ . Наибольшее влияние на изменение  $Q$  оказывали вариации  $x_j$  при использовании среднего гармонического взвешенного по формуле (11), а наименьшее – при среднем квадратическом взвешенном по формуле (12).

Анализ полученных данных показал, что при использовании любого из рассмотренных средних взвешенных для определения комплексного показателя качества и представлении зависимостей единичных показателей качества от определяющих факторов в виде полинома или произведения степенных функций, влияние всех независимых параметров на  $Q$  качественно примерно одинаковое. Это позволяет утверждать, что при сопоставительной оценке подобных объектов и при сохранении перечня  $x_j$  ряд приоритетов сохранится. Однако количественно уровень  $Q$  при одинаковых значениях определяющих факторов может изменяться до 4 и более раз в зависимости от выбранного вида среднего взвешенного, что обуславливает необходимость сопоставительной оценки в рамках одинакового среднего взвешенного.

Наибольшее влияние на изменение  $Q$  при наименьшей стабильности результатов расчета имели место в случае определения среднего гармонического взвешенного по формуле (11).

Наименьшее влияние указанных факторов на уровень  $Q$  зафиксировано при использовании среднего квадратического взвешенного по формуле (12).

Использование выражения (9) сопровождалось приемлемой точностью представления результатов обработки во всех рассмотренных случаях и было достаточно «чувствительным» к изменению всех независимых переменных (см. рисунки 3 и 4).

Следует также обратить внимание на заметное повышение стабильности (уменьшении уровня коэффициента вариации) при увеличении количества факторов, влияющих на комплексный показатель качества объекта.

## Заключение

Поскольку решение о выборе лучшего объекта из ряда ему подобных определяется сопоставлением соответствующих значений комплексного показателя качества  $Q$ , при выборе рационального вида среднего взвешенного следует, прежде всего, руководствоваться чувствительностью этого параметра к изменению влияющих факторов и стабильностью представления данных анализа. С этой точки зрения для рассмотренных моделей объектов оценки наиболее приемлемым можно принять использование среднего арифметического взвешенного.

Таким образом, путем обобщенного рассмотрения типичных частных случаев формирования комплексного показателя качества объекта с помощью различных средних взвешенных оценок (сверток) при учете значимости соответствующих единичных показателей качества, показателя неполноты описания объекта и влияния на объект существенных технических и/или технологических, и/или организационных факторов процесса показано, что в рамках реального диапазона изменения влияющих параметров расчетные уровни комплексного показателя качества и его стабильность существенно зависят от вида свертки на основе средних взвешенных величин. В условиях априорной неопределенности вида такой свертки при выборе лучшего представителя из соответствующего класса целесообразно пользоваться средней арифметической взвешенной оценкой комплексного показателя качества объекта.

Перспективным направлением исследований является введение в рассмотрение дополнительных единичных показателей качества, например, ответственных за безопасность процессов, а также расширение перечня исходных факторов, влияющих на процесс.

Полученные данные могут послужить основой для обоснованного выбора вида среднего взвешенного при оценке качества разнообразных объектов и принятии решений о рациональных уровнях управляющих факторов, обеспечивающих удовлетворение требований потребителей.

## Список использованных источников

1. Azgaldov, G. Applied Qualimetry: Its Origins, Errors and Misconceptions / G. Azgaldov, A. Kostin // Benchmarking: Int'l J. – 2011. – Vol. 3. – P. 428–444. doi: 10.1108/14635771111137796
2. Засименко, В.М. Основи теорії планування експерименту / В.М. Засименко. – Львів : Вид. Національного університету «Львівська політехніка», 2000. – 205 с.
3. Ando, T. Geometric means / T. Ando, C. Li, R. Mathias // Linear Algebra and its Applications, 2004. – Vol. 385. – P. 305–334. doi: 10.1016/j.laa.2003.11.019
4. Bini, D. A note on computing matrix geometric means / D. Bini, B. Iannazzo // Advances in Computational Mathematics. – 2011. – Vol. 35. – P. 175–192. doi: 10.1007/s10444-010-9165-0
5. Morganstein, D. Continuous Quality Improvement in Statistical Agencies / D. Morganstein, D. Marker // Measurement and Process Quality. – New York : Wiley, 1997. – P. 475–500.

6. Должанский, А.М. Теоретические основы усовершенствованного метода оптимизации управляющих воздействий на объекты / А. Должанский, О. Бондаренко, В. Гладких // Інформаційне забезпечення систем прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах : колективна монографія. – Донецьк : ЛАНДОН-XXI, 2013. – С. 329–353. ISBN 978-617-7049-71-4

7. Должанский, А.М. Максимизация комплексного показателя качества объекта путем его квалиметрической оценки / А.М. Должанский [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2013. – № 7. – С. 5–9.

8. Szutkowska, J. Zarządzanie jakością w statystyce publicznej: standardy, metody, modele i narzędzia / J. Szutkowska // Wiadomości Statystyczne. – 2012. – Nr. 11. – P. 38–51.

9. Sohal, A. TQM in Australian manufacturing: factors critical to success / A. Sohal, M. Terzivski // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2000. – Vol. 17 (2). – P. 158–167.

**doi:** 10.1108/02656710010304564

10. Chong, V.K. Total quality management, market competition and organizational performance / V.K. Chong, V. Rundus // British Accounting Review. – 2004. – Vol. 36. – P. 155–172. **doi:** 10.1016/j.bar.2003.10.006

11. Palfia, M. A multivariable extension of two-variable matrix means / M. Palfia // SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. – 2011. – Vol. 32 (2). – P. 385–393. (IF'10:2.411)

## References

1. Azgaldov G., Kostin A. Applied Qualimetry: Its Origins, Errors and Misconceptions. *Benchmarking, Int'l J.*, 2011, vol. 3, pp. 428–444.

**doi:** 10.1108/14635771111137796

2. Zasiemenko V.M. *Osnovi teorii planuvannya eksperimentu* [Fundamentals of the theory of experiment

planning], Publishing house of Lviv Polytechnic National University, 2000, 205 p. (in Ukraine).

3. Ando T., Li C., Mathias R. Geometric means. *Linear Algebra and its Applications*, 2004, vol. 385, pp. 305–334. **doi:** 10.1016/j.laa.2003.11.019

4. Bini D., Iannazzo B. A note on computing matrix geometric means. *Advances in Computational Mathematics*, 2011, vol. 35, pp. 175–192.

**doi:** 10.1007/s10444-010-9165-0

5. Morganstein D., Marker D. Continuous Quality Improvement in Statistical Agencies. *Measurement and Process Quality*, New York, Wiley, 1997, pp. 475–500.

6. Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Gladkikh O.B. [Theoretical bases of the advanced method of optimizing control effects on objects]. *Information support of decision-making systems in economics, technology and organizational spheres: collective monograph*, Donetsk, «LANDON-XXI» Publishing, 2013, 592 p. (in Ukraine).

7. Dolzhanskiy A.M., Bondarenko O.A., Gladkikh B.A., Kuzmenko C.H. [Maximization of the complex index of the quality of the object by its qualitic estimation]. *Metodi menedjmenta kachestva* [Methods of quality management]. 2013, vol. 7, pp. 5–9 (in Russian).

8. Szutkowska J. [Quality management in state statistics: standards, methods, models and tools]. *Wiadomości Statystyczne*, 2012, no. 11, pp. 38–51 (in Polish).

9. Sohal A., Terzivski M. TQM in Australian manufacturing: factors critical to success. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2000, vol. 17 (2), pp. 158–167. **doi:** 10.1108/02656710010304564

10. Chong V.K., Rundus V. Total quality management, market competition and organizational performance. *British Accounting Review*, 2004, vol. 36, pp. 155–172. **doi:** 10.1016/j.bar.2003.10.006

11. Palfia M. A multivariable extension of two-variable matrix means. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 2011, vol. 32 (2), pp. 385–393. (IF'10:2.411)

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и четким. Фотографии представляются в электронном виде (**формат tif, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т.д. Подписи к рисункам даются на отдельном листе на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы, символы химических элементов (в т.ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

# AUTHOR GUIDELINES

---

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

---

Индексы:  
74835; 748352