ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Nº 4

Vol. 9

Том 9

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 9	Nº 4	2018

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)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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)

Колтунович Т.Н., д.т.н., профессор, Люблинский технологический университет (г. Люблин, Польша)

Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко 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)

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

Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета

Погребняк А.Д., *д.ф.-м.н.*, профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)

Распопов В.Я., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)

Тимчик Г.С., д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» (г. Киев, Украина) **Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

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: Чабарова О.Л., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 03.12.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,11. Уч.-изд. л. 3,59. Тираж 150 экз.

Дата выхода в свет 14.12.2018. Заказ № 1016

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 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

© «Приборы и методы измерений», 2018

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 9 № 4	2018
--------------	------

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, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

EDITORIAL BOARD

Vladimir A. Alekseev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of M.T. 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)

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)

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

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

Tomasz N. Koltunowicz, Doctor of Science (Engineering), Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

Fadey F. Komarov, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, 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)

Vladimir A. Pilipenko, Corresponding Member of the 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, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

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

Vladimir Ya. Raspopov, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)*

Gryhoriy S. Tymchyk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Instrumentation Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine) **Tse Li**, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)

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

Alexey P. Shkadarevich, Academician of the 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

© «Devices and Methods of Measurements», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

Kozhevnikov D.A., Fiodortsev R.V., Silie A.R.		
Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing Equipment		
Поклонский Н.А., Вырко С.А., Власов А.Т., Сягло А.И., Раткевич С.В.		
Модель электромагнитного излучателя на основе потока одиночных электронов внутри изогнутой углеродной нанотрубки	288	
Гулис И.М., Купреев А.Г.		
Повышение спектрального разрешения многощелевого спектрометра с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением	296	

Методы измерений, контроля, диагностики

Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Чигирь Г.Г., Филипеня В.А., Горушко В.А.	
Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов	306
Баринов А.А., Главный В.Г., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Хробостов А.Е.	
Методика обоснования представительности измерений при помощи пространственных кондуктометрических датчиков для исследования гидродинамики однофазных потоков теплоносителя	314
Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.	
Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта	325
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.	
Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии	337
Антошин А.А., Волков С.А.	
Методика исследования пространственного распределения параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и смежных с ним пространствах	347

CONTENTS

Measuring Instruments

Kozhevnikov D.A., Fiodortsev R.V., Silie A.R.	
Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing Equipment	280
Poklonski N.A., Vyrko S.A., Vlassov A.T., Siahlo A.I., Ratkevich S.V.	
Model of Electromagnetic Emitter Based on a Stream of Single Electrons inside Curved Carbon Nanotube	288
Gulis I.M., Kupreyeu A.G.	
Increasing of Spectral Resolution of Multislit Imaging Spectrometer with Diffractive Grating	296
Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics	
Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A., Gorushko V.A.	
Reliability Express Control of the Gate Dielectric of Semiconductor Devices	306
Barinov A.A., Glavny V.G., Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Ryazanov A.V., Khrobostov A.E.	
Method of Measurement Representativeness Assessment for Spatial Conductometric Sensors as Applied to Investigation of Hydrodynamics in Single Phase Flows	314

Baev A.R. Mavorov A.L. Asadchava M.V. Levkovich N.V. Zhavoronkov K.G.	
Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation	
of Physicomechanical Properties of Solids. Part 1. Influence of the Geometrical Parameters	325

Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N.	
Lens Raster as a Source of Distortions in Integral Photography	337

Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing Equipment

Kozhevnikov D.A.¹, Fiodortsev R.V.¹, Silie A.R.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus ²National Center of Optical Technologies, Los Proceres Ave, sector La Pedregosa, housing 4, Merida 5101, Venezuela

Received 02.11.2018 Accepted for publication 26.11.2018

Abstract

The object of the research is the development of the method of aperture synthesis of a mirror system designed for remote sensing of the Earth.

The analysis of existing methods for the formation of the synthesized aperture was carried out, their accuracy, cost, and mass-dimensional characteristics were evaluated. A new version of the optical system of the synthetic aperture mirror lens is presented and its optimization is performed in the *Zemax* software package. An estimate of the accuracy of the designed system has been made; a design variant has been developed that includes a transformation mechanism when the telescope is put into near-earth orbit.

As a result of the study, the design parameters of the base lens were determined: a focal length of 13 m, a main mirror diameter of 800 mm, a field angle of 0.25° for modifying a telescope for a low orbit; and the entire telescope as a whole: the lag from the main axis of the telescope is 1.2 m, the angle of rotation of the flat mirror for combining images $(45 + 1,5)^{\circ}$, the signal-to-noise ratio (189 in a low orbit with an angle of the Sun 0°, 15 in the geostationary orbit with a sun angle of 60°).

It has been established that the use of aperture synthesis technology allows the development of highresolution optical-electronic systems with lower production and operation costs compared with classical methods for forming the surface of the main mirror. In the course of the simulation, the instability of the values of the frequency-contrast characteristic with increasing angle of view was determined, which is important for a low near-earth orbit, and the requirement for positioning elements of the optical system was established.

Keywords: orbital telescope, mirror, synthesized aperture.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-280-287

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Кожевников Д.А.	Kozhevnikov D.A.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: dmkz.1408@gmail.com; feod@tut.by	e-mail: dmkz.1408@gmail.com; feod@tut.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Kozhevnikov D.A., Fiodortsev R.V., Silie A.R.	Kozhevnikov D.A., Fiodortsev R.V., Silie A.R.
Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing	Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing
Equipment.	Equipment.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
2018. – T. 9, N_{2} 4. – C. 280–287.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 280–287.
DOI: 10.21122/220-9506-2018-9-4-280-287.	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-280-287

УДК 535.015, 535.422

Орбитальный телескоп с синтезированной апертурой для аппаратуры дистанционного зондирования Земли

Кожевников Д.А.¹, Фёдорцев Р.В.¹, Силие А.Р.^{1,2}

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

²Национальный центр оптических технологий пр-т Лос Процерес, сектор Ла Педрегоса, корпус 4, г. Мерида 5101, Венесуэла

Поступила 02.11.2018 Принята к печати 26.12.2018

Объектом исследования являлась разработка метода апертурного синтеза зеркальной системы, предназначенной для дистанционного зондирования Земли.

Проведен анализ существующих методов формирования синтезированной апертуры, оценена их точность, стоимостные, а также массогабаритные характеристики. Представлен новый вариант оптической системы зеркального объектива с синтезированной апертурой и выполнена его оптимизация в программном пакете Zemax. Произведена оценка точности спроектированной системы, разработан вариант конструкции, включающий механизм трансформации при выводе телескопа на околоземную орбиту.

В результате исследования определены конструктивные параметры базового объектива: фокусное расстояние 13 м, диаметр главного зеркала 800 мм, угол поля зрения 0,25° для модификации телескопа для низкой орбиты; и всего телескопа в целом: отставание от главной оси телескопа 1,2 м, угол поворота плоского зеркала для совмещения изображений (45 + 1,5)°, отношение сигнал/шум (189 на низкой орбите с углом Солнца 0°, 15 на геостационарной орбите с углом Солнца 60°).

Установлено, что использование технологии апертурного синтеза позволяет разрабатывать оптико-электронные системы высокого разрешения с меньшими затратами на производство и эксплуатацию по сравнения с классическими методами формирования поверхности главного зеркала. В ходе проведения моделирования была определена неустойчивость значений частотно-контрастной характеристики при увеличении угла поля зрения, что актуально для низкой околоземной орбиты, а также установлено требование по ошибкам позиционирования элементов оптической системы.

Ключевые слова: орбитальный телескоп, зеркало, синтезированная апертура.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-280-287

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Кожевников Д.А.	Kozhevnikov D.A.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: dmkz.1408@gmail.com; feod@tut.by	e-mail: dmkz.1408@gmail.com; feod@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Kozhevnikov D.A., Fiodortsev R.V., Silie A.R.	Kozhevnikov D.A. Fiodortsev R.V., Silie A.R.
Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing	Synthetic Aperture Orbital Telescope for Earth Remote Sensing
Equipment.	Equipment.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 280–287.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 280–287.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-280-287	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-280-287

Introduction

One of the main requirements for modern orbiting telescopes is to ensure the maximum resolution of the optical system while maintaining a high level of image contrast. The formation and characterization of Earth remote sensing data (ERS) is determined by the orbit height of the spacecraft (SC), the type of sensors and imaging equipment used, which in turn determine: the scale of the maps, the bandwidth and the width of the territory, as well as the resolution of the images. A large number of spacecraft for remote sensing are designed based on the conditions of their work in low orbits 400–800 km.

The spectral resolution of the optical-electronic systems of a spacecraft is determined by the atmospheric transparency windows in the visible (380–720 nm) and near infrared (720–1300 nm) spectral regions. Some sensors of some satellites (for example, IRS-P6 or SPOT 5) use the middle infrared range (up to 1.75 μ m) or the far infrared range 10.4–12.5 μ m (Landsat 7 ETM +) (Table 1) [1, 2].

The spatial resolution determines the smallest size of objects that can be distinguished in the image and can be carried out both in panchromatic mode (more accurate) and in multispectral mode. Today, ultra-high-resolution images include images in which objects of 0.3–0.9 m in size are visible [3].

The actual task remains to increase the temporal resolution, which determines the frequency of obtaining images of a specific area on the earth's surface. For existing space remote sensing satellites, the best spatial resolution is 1–3 days. In this case, the duration of observation for one surface area is limited to a time interval of not more than 1 min [4]. However, there are a number of areas that require almost continuous surveys for a sufficiently long period of time (for example, meteorology – during the development of cyclones and hurricanes, agriculture – monitoring of areas covered by forest fires, as well as the military area and antiterrorist operations for tracking facilities that pose a potential threat, and other emergencies).

Table 1

Main technical characteristics of spacecraft with high and ultra-high resolution sensors for remote sensing

Space satellite (sensor)	Opto- electronic system (camera)	Spectral resolution (µm)	Swath (km)	Temporary Resolution (days)	Spatial resolution, (m)	Map scale
Landsat 7 ETM+	SMA+SLC	0.45–2.35; 10.4–12.5	185	16	15	1:100 000
Resourcesat-1 (IRS-P6)	LISS-III,IV; AwiFS	0.52-1.70	23.9; 70; 141; 740	5	56; 23.5; 5.8	1:50 000
SPOT 5	HRS	0.45-1.75	60; 1000– 2000	26; 1	5-10; 1000	1:25 000
ALOS	PRISM, AVNIR-2	0.42-0.89	35; 70	46	10-2.5	1:25 000
EROS-B,C	ELOP	0.50-0.90	16-7.14	15	2.8-0.7	1:10 000
Resource DK	Geocon-1	0.50-0.80	4.7-28.3	6	2-3	1:5 000
OrbView 3, 4	OHRIS (TMA)	0.45-0.90	8×8	3	4-1	1:5 000
IKONOS-2	Eastman Kodak (RPC)	0.45-0.88	$11,3 \times 11,3;$ 11×100	14	3.28-0.82	1:5 000
GeoEye-1	Kodak и ITT Industries	0.45-0.92	15.2	1-3	1.65-0.41	1:2 000
WorldView-3	Eastman Kodak	0.40-2.25	17.6	1-3	1.24–0.31 (VNIR); 3.72 (SWIR); 30 (CAVIS)	1:2 000
QuickBird-2	BGIS-2000 (BHRC 60)	0.45-0.90	16.5	1-5	2.44-0.61	1:2 000

The increase in temporal resolution is possible in two directions. The first is the formation in orbit of a group of spacecraft synchronized in a photograph when working on a specific part of the surface. In connection with the occasional occurrence and solution of the above problems from an economic point of view, the implementation of such a satellite placement option is not always justified. The second is an increase in the height of the orbit of the spacecraft, which leads to an increase in the time of its stay over a specific part of the earth's surface. Launching the satellite into a geostationary orbit (GSO) (35.786 km above sea level) with rotation in the direction of the Earth's rotation, with an orbital speed of 3.07 km/s, ensures their mutual synchronization (sidereal day: 23 h 56 min 4,091 s). The disadvantages of telescopes located at the GSO include the total delay of the transmitted signal of about 2-4 s and the impossibility of observing parts of the Earth's surface at high latitude (81°–90°) or significant signal shielding by ground objects already at latitude (from 75°).

To form a high-resolution image with a telescope located in a GSO, the aperture of its main mirror should be about 30-40 m. Making such a mirror and then placing it into orbit is a difficult task. In classical spacecraft for remote sensing (Table 1) the aperture of the input window of the optical system is about 0.4-1.1 m.

An increase in the aperture of the main mirror leads to additional difficulties associated with an increase in its mass, as well as the need to install additional mechanisms for balancing and adjusting. In addition, technological costs associated with the formation of a high-quality reflective surface increase. Creating systems with a large aperture was made possible by splitting the main mirror into segments [5, 6].

According to the theory, in a synthesized aperture telescope, the final image is formed from separate fragments of several mirror modules and is equivalent in quality to a telescope with a solid mirror surface, provided that the images are geographically acceptable and phase synchronized. Today, the problems of simulating synthetic aperture systems from a practical point of view have been successfully solved only for ground-based observatories: the Very Large Telescope of the South European Observatory (VLT ESO); Hopkins multi-mirror telescope (MZT) and mainly for radar systems (Murchison Radio Astronomy Observatory, ASKAP). Orbital telescopes with segmented elements of the main mirror are implemented only in James Webb Space Telescope (JWST) [7]. Design options for orbital telescopes with synthetic aperture are currently lacking.

The purpose of the research was to develop a concept and determine possible options for building a high-resolution orbital telescope with a synthesized aperture of the main mirror for a remote sensing satellite located in a geostationary orbit.

Analysis of the effectiveness of systems with segmented and synthesized apertures

In the TCA based on the power modules, the optical axes of the lens are parallel to each other, and the rear focal segments are reduced to a single point by a system of mirrors (Figure 1).



Figure 1 – Optical scheme of the power module of the telescope

It can be seen from the figure that the focal plane of the *j*-th objective forms an angle ω_j with the plane passing through the point *F'* perpendicular to the optical axis of the telescope. The inclination of the focal plane leads to a longitudinal defocusing of the image, and to a transverse shift of it in the common image plane. In addition, the tilt of the image causes a phase shift of the light oscillations, which leads to disruption of the phase conjugation of the folding wavefronts. The formation of a synthesized aperture by combining individual power modules provides a relatively low image quality (at m₀ = 1 m, and W = 1", W_{00ji} = 10 µm) [8].

The main advantage of afocal systems is to maintain the parallelism of the beams after passing through the modules – there is no image tilt. In this regard, to project an image onto a photodetector, a collector telescopic system is needed, to which high demands are made. The telescopic system T_j , through a system of flat mirrors E_{1j} and E_{2j} , generates light for

the focusing system φ . A generalized optical scheme can be represented as a combination of afocal modules and a central focusing system (Figure 2).



Figure 2 – Optical scheme of a synthetic aperture telescope from afocal modules

A serious obstacle to the composition of the optical system of the synthesized aperture from afocal modules is the curvature of the image, the elimination of which is possible in principle by the complexity of the module circuit or the introduction of adaptive systems. Then the main problem is the condition for the fulfillment of the invariance of the collector system, in which the Fresnel number for the system must correspond to the Fresnel number of the entire telescope, which significantly increases the complexity of this component.

The results of the analysis of the conceptual schemes of telescopes with segmented and synthesized apertures of the main elements for a number of key characteristics are presented in Table 2.

Table 2

Comparison of properties and characteristics of telescopes with a segmented main mirror, synthetic aperture telescope with power and afocal modules

The name of the	Segmented main mirror	Synthesized aperture		
characteristic	Segmented main millor	With power modules	With afocal modules	
Shielding factor	0.07-0.15	0.7–0.9	0.8–0.9	
Phase shift	$0.110* \ \mu m$ $m_0 = 3.3 \ m,$ $2\omega = 2.2 \times 4.4'$	$10 \ \mu m$ $m_0 = 1 \ m, \ 2\omega = 2''$	$0,033.\mu m$ $m_0 = 1 m, 2\omega = 1'$	
Optional equipment	Adaptive mirror curvature monitoring system	Module Position Control System	Collector Telescope Module Position Control System	
Features of manufacturing technology	Difficulties in the development of aspherical surfaces	High requirements for equality of focal lengths and curvature of images	High requirements for the telescope-collector and the curvature of images	
Assembly and adjustment	Precise mirror curvature setting automatically	High complexity of the adjustment of individual modules and their system relative to the receiver, requiring special equipment	The adjustment difficulty is high, but fewer parameters are being monitored than in the system with power modules	
Cost coefficient	1**	0.76**	0.84*	
Weight	m = 300–800 kg	m/γ***	m/0.8γ***	

* JWST compliant [9]

** according to the source [10]

*** γ – the ratio of the diameter of the equivalent aperture to the diameter of the module

Optical system of a synthetic aperture telescope and image quality assessment

Based on the analysis of existing models of optoelectronic systems of the Earth remote sensing satellite, the main technical parameters have been formed, which the new version of the synthetic aperture orbital telescope (TSA) should satisfy (Table 3). Let us take the TSA system based on the power modules, which are the Nesmith system, for calculation.

The diameter of the synthesized aperture is determined taking into account the maximum allowable dimensions of the launch vehicle, equal to 4000 mm for the diameter. Accepting design technological gaps equal to 500 mm in diameter, the TSA optical system should be inscribed in a circle with a diameter of $D_{eq} = 3500$ mm. The diameter of the main mirror of the module is set to $D_{mod} = 800$ mm, taking into account the need to observe intermodular gaps ΔN_1 .

Table 3

Initial technical parameters of the synthetic aperture telescope

Parameter name	Numerical value
Orbit height:	
low	750 km
GSO	36000 km
Working spectral range	0.4–0.85 nm
Number and type of spectral channels	1
	(panchromatic)
MTF on the Nyquist frequency	0.3
Capture width (at an altitude of 750 km)	12 km
Spatial resolution	0.3 m
The minimum height of the sun to the surface normal	60°
Overall dimensions of the system, not more $(L \times D)$	$12000\times4000\text{mm}$
Lens weight, not more	180 kg

The shielding factor is assumed to be q = 0.23 to meet the requirements for luminosity and system dimensions, and the beam convergence index is $\beta = 0.46$ to comply with the maximum relative aperture (1:7.5) of the main mirror.

In the Zemax software package, we introduce a system of flat mirrors for carrying out the image and optimize the system – assign OPDX as the operand of the standard automatic optimization, assign the radii of curvature of the mirrors, air gaps along the optical axis and the Conic operator of many orders (up to 4-th order) with variable optical system parameters responsible for the shape of the surface of the mirrors. As a result of the optimization, the design parameters of the base telescopic module were determined, from which the model of the entire TSA was made (Figure 3).

The pixel size in modern CCD-line-ups is $6-8 \mu m$, while the number of lines in integral assemblies reaches 12-14 pcs., which ensures the geometric and energy parameters of the required linear resolution on the ground (0.3 m).

Figure 4 shows the graphs of the frequencycontrast characteristic (MTF) and point spreading functions (PSF) showing the quality of the designed optical system.



Figure 3 – Ray path in synthetic aperture telescope (model *Zemax*): 1 – main mirror; 2 – secondary adaptive mirror; 3 – flat mirror; 4 – swivel mirror; 5 – phase sensor plane



Figure 4 – System quality functions: a – frequencycontrast characteristic diagram for two angles (0° and 0.25°); b – graph of the point spreading functions for four wavelengths (indicated in the figure)

The concept of transformation options for the design of a synthetic aperture telescope

The layout of the in-orbit output should ensure the durability of the system with starting overloads; therefore, the optimal solution is to place the optical components on the moving arms reducing the distance of the mirrors from the main axis of the TSA. The result of the graphical simulation of the system is presented in Figure 5.



Figure 5 – Result of graphical simulation of a synthetic aperture telescope system: a – in the position of putting into orbit; b – in working position in geostationary orbit. 1 – the module of the main mirror; 2 – module of the secondary adaptive mirror; 3 – the module of a flat mirror; 4 – the piston; 5 – housing column; 6 – lever; 7 – base ground; 8 – the piston; 9 – bar; 10 – break block

The design of the TSA includes a number of moving elements of three types: transformational, adjusting, modal. The transformation includes the piston groups of the modules of the main mirrors 1, secondary mirrors 2 and flat mirrors 3. The piston 4 is installed in the axles, the axis connects the piston

with the mount on the column-body 5, the axis is mounted on the lever 6 of the main mirror, in the unopened state the piston holds the lever under angle 45° to the axis of the TSA, in the open position, the lever rests against the abutment area of the base 7 of the secondary mirror unit (Figure 5*a*). The piston 8 is installed in the axles, the axis connects the piston with fastening on the column body 5, the axis is mounted on the bar 9 of the flat mirror 3, in an undisclosed state the piston holds the bar at an angle of 20° to the axis of the TSA, in the open position the bar abuts against the base of the block base kink 10 (Figure 5*b*).

The orientation of the main mirror 1 in space is carried out along five axes at the expense of six actuators 2, rigidly fixed in pairs on the bracket 3 at an angle of 20° to each other. When a control voltage is applied, the actuator stem 4 performs a linear movement along the axis and acts on the thrust bearing 5 with an elastic tip 6. The brackets 3 are interconnected by a common frame base 7 (Figure 6).



Figure 6 – The mechanism of orientation of the main mirror: 1 – the main mirror; 2 – actuator; 3 – bracket; 4 – stock; 5 – thrust bearing; 6 – tip; 7 – base

Based on all the specified parameters, the calculation was performed in *MathCAD* using the brightness data of the Earth's surface and the receiver data. Table 4 shows the resulting values of the signal-to-noise ratio.

l	al	bl	е	4	
---	----	----	---	---	--

79.7

Signal-to-noise	ratio	for	various	modes	of
operation of a sy	nthetio	c ape	rture teles	cope	
Sun height Orbit height	90°	(zenit	h)	30°	

189.3

36000 km26.315.56The obtained values are satisfactory for
remote sensing equipment. Thus, the operability
of the system of a synthetic aperture telescope was
proven.

750 km

Conclusion

Various synthetic aperture systems for Earth remote sensing equipment are considered. Mathematical modeling has shown that it is possible to meet the requirements for linear resolution on the ground that meet overall and energy criteria, while the positioning errors and the relative position of the individual components should not exceed the dimensions of the working wavelength.

The main design parameters of the synthesized aperture telescope were determined: the lag from the main axis of the telescope is 1.2 m, the angle of rotation of the flat mirror for image alignment $(45 + 1.5)^\circ$, the signal-to-noise ratio (189 in low orbit with the angle of the Sun 0°, 15 in a geostationary orbit with a Sun angle of 60°), as well as the parameters of the base lens: a focal length of 13 mm, a main mirror diameter of 800 mm, a field of view angle of 0.25°.

The prospect for the development of research in this area can be called the development of the method of phasing images of individual modules with various levels of accuracy (coarse, medium, fine adjustments). Also of interest is the deepening of modeling the system of a synthetic aperture telescope to achieve higher quality indicators of the formed image. Work on the design may include a modification of the transformation mechanism in order to reduce the longitudinal size of the system.

References

1. Sharing Earth Observation Resources. eoPortal Directory. Satellite Missions. European Space Agency. ESA 2000-2018. Available at: https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions

2. QuickBird Imagery Products. Product Guide. DigitalGlobe, Inc. Revision 4.7.1. Release Date: 1 May 2006, 78 p.

3. Kobernichenko V.G., Trenikhin V.A. [Methods of image synthesis based on remote sensing data of the earth of various resolutions]. *Successes of modern radio electronics*, 2007, no. 4, pp. 22–31 (in Russian).

4. Malinnikov V.A., Stetsenko A.F., Altynov A.E., Popov S.M. Monitoring prirodnoy sredi aerokosmicheskimi sredstwami [Monitoring the natural environment by aerospace tools], Moscow, MIIGAiK Publ., 2008, 173 p. (in Russian).

5. Demin A.V. Mathematical model of the process of adjustment of composite mirrors // News of universities. Instrument making. – 2015. – Vol. 58, no. 11, pp. 901–907 (in Russian). **DOI:** 10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907

6. Curtis Baffes, Terry Mast, Jerry Nelson, Eric Ponslet, Vince Stephens, Larry Stepp, Eric C. Williams. Primary Mirror Segmentation Studies for the Thirty Meter Telescope. SPIE 7018-29, TMT.OPT.JOU.08.003. REL01, JPL CL#08-1541. – 15 p.

7. Sabelhaus P.A., Decker J.E. An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project. *Proceeding of SPIE*, 2004, vol. 5487, 14 p. **DOI:** 10.1117/12.549895

8. Demin A.V., Kovalev I.A. The Mathematical model and the simulation modelling algorithm of the multitiered mechanical system. *ABC Journal of Advanced Research*, 2013, моl. 2(1), is. 3, pp. 44–48. **DOI:** 10.18034/abcjar.v2il.427

9. Gardner J.P., Mather J.C., Clampin M., Doyon R., Greenhouse M.A., Hammel H.B., Wright G.S. The James Webb space telescope. *Space Science Reviews*, 2006, vol. 123(4), pp. 485-606. **DOI:** https://doi.org/10.1007/ s11214-006-8315-7

10. Ermolaeva E.V., Zverev V.A., Filatov A.A. Adaptivnaya optika [Adaptive optics]. – SPb: NRU ITMO, 2012. – 297 p. (in Russian).

УДК 539.216.1; 621.315.592

Модель электромагнитного излучателя на основе потока одиночных электронов внутри изогнутой углеродной нанотрубки

Поклонский Н.А., Вырко С.А., Власов А.Т., Сягло А.И., Раткевич С.В.

Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 25.10.2018 Принята к печати 30.11.2018

Вопросы создания и использования микро- и нанометровых антенн для генерации и приема электромагнитного излучения все еще актуальны как в фундаментальном, так и в прикладном аспектах. С уменьшением размеров антенны частота электромагнитного излучения увеличивается, а мощность – падает. Для увеличения мощности излучения обычно применяются периодические (в пространстве) электродинамические структуры. Цель работы – найти возможность применения инжекции и (квази)баллистического дрейфа одиночных электронов внутри изогнутых углеродных нанотрубок для излучения электромагнитной волны в микроволновом диапазоне и определить параметры излучательной системы, которые влияют на мощность излучения.

Расчетным способом в рамках классической электродинамики показана принципиальная возможность генерации электромагнитного излучения гигагерцового диапазона потоком одиночных электронов внутри полой изогнутой диэлектрической углеродной нанотрубки.

Установлено, что спектром и мощностью этого излучения можно управлять, варьируя плотность потока электронов, длину и кривизну полой нанотрубки.

Результаты работы могут быть использованы при разработке микроминиатюрного источника микроволнового электромагнитного излучения на основе изогнутой углеродной нанотрубки в технике бесконтактной зондовой микроскопии.

Ключевые слова: изогнутая полая углеродная нанотрубка, поток одиночных электронов, электромагнитный излучатель, электрический дипольный момент.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Поклонский Н.А.	Poklonski N.A.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by	e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Поклонский Н.А., Вырко С.А., Власов А.Т., Сягло А.И., Раткевич С.В.	Poklonski N.A., Vyrko S.A., Vlassov A.T., Siahlo A.I., Ratkevich S.V.
Модель электромагнитного излучателя	[Model of Electromagnetic Emitter
на основе потока одиночных электронов	Based on a Stream of Single Electrons
внутри изогнутой углеродной нанотрубки.	inside Curved Carbon Nanotube].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 288–295.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 288–295 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295

Model of Electromagnetic Emitter Based on a Stream of Single Electrons inside Curved Carbon Nanotube

Poklonski N.A., Vyrko S.A., Vlassov A.T., Siahlo A.I., Ratkevich S.V.

Belarusian State University, Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 25.10.2018 Accepted for publication 30.11.2018

Abstract

The problems of elaboration and application of micro- and nanometer sized antennas for the generation and reception of electromagnetic radiation is still relevant in both fundamental and applied aspects. With decreasing antenna size, the frequency of electromagnetic radiation increases, and its power decreases. To increase the radiation power, the periodic (in space) electrodynamic structures are used. The aim of the work is to find the possibility of application of injection and (quasi)ballistic drift of single electrons inside curved carbon nanotubes for emission of electromagnetic waves in the microwave range and to determine the parameters of the radiating system that affect the radiation power.

By the calculation within the framework of classical electrodynamics it is shown the possibility in principle of generation of electromagnetic radiation of the gigahertz range by a stream of single electrons inside a hollow curved dielectric carbon nanotube.

It was found that the spectrum and power of this radiation can be controlled by varying the electron flux density, length and curvature of the hollow nanotube.

The results of the work can be applied for elaboration of a microminiature emitter of microwave electromagnetic radiation based on a curved carbon nanotube in the engineering of contactless probe microscopy.

Keywords: curved hollow carbon nanotube, stream of single electrons, electromagnetic emitter, electric dipole moment.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Поклонский Н.А.	Poklonski N.A.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by	e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Поклонский Н.А., Вырко С.А., Власов А.Т., Сягло А.И., Раткевич С.В.	Poklonski N.A., Vyrko S.A., Vlassov A.T., Siahlo A.I., Ratkevich S.V.
Модель электромагнитного излучателя	[Model of Electromagnetic Emitter
на основе потока одиночных электронов	Based on a Stream of Single Electrons
внутри изогнутой углеродной нанотрубки.	inside Curved Carbon Nanotube].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 288–295.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 288–295 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-288-295

Введение

Прямая (неизогнутая) одностенная углеродная нанотрубка – это полая цилиндрическая макромолекула с нанометровым диаметром и микронной длиной [1]. Уникальные механические [2] и электрические [3] свойства одностенных углеродных нанотрубок дают возможность изготавливать на их основе устройства электромеханики, наноэлектроники и радиооптики [4–7].

Расчет электромеханических и оптоэлектронных устройств из углеродных нанотрубок методами квантовой физики и химии (из первых принципов) все еще невозможен [8], поэтому создание физической модели, отражающей экспериментально достижимую ситуацию [6], является актуальной задачей.

Отметим, что с уменьшением размеров радиоантенны частота излучения увеличивается, а мощность излучения падает. Поэтому в антеннах с размерами активных элементов много меньшими длины волны излучения для увеличения мощности применяются периодические (в пространстве) электродинамические структуры [9].

Цель работы – расчетным способом указать возможность применения изогнутой углеродной нанотрубки в изоляторном состоянии, внутри которой движутся одиночные электроны, для получения электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне длин волн.

Здесь заметим, что электрон, движущийся по искривленной траектории, излучает при любом соотношении между скоростью, кривизной траектории и фазовой скоростью электромагнитных волн в окружающей электрон среде [10, 11].

Рассмотрим одностенную углеродную нанотрубку, пассивированную с двух сторон водородом (извне и внутри), так что проводимость углеродного каркаса трубки пренебрежимо мала. (Известна пассивация водородом графена (бесщелевого полупроводника), сопровождающаяся превращением графена в изолятор – графан [12].) В качестве электрических контактов (катода и анода) к углеродной нанотрубке могут использоваться «атомные» контакты [13]. В частности, в качестве катода с низкой величиной работы выхода электронов под действием света могут использоваться металлические наночастицы, активированные цезием и кислородом [14]. Для получения одиночных электронов внутри нанотрубки может быть реализована схема кулоновской дезынтеграции слабых электронных потоков [15].

Далее, для одиночных электронов, испущенных (фото)катодом, необходимо создать условия для движения их от катода к аноду по траектории, которая находится внутри углеродной нанотрубки. Например, внешним источником магнитного поля создать такую конфигурацию магнитных силовых линий, чтобы линии магнитной индукции совпадали с изогнутой нанотрубкой. Здесь можно воспользоваться аналогией со схемой создания конфигурации магнитного поля для получения магнитодрейфового (изгибного) электромагнитного излучения релятивистских электронов [16, 17]. Итак, полая углеродная диэлектрическая нанотрубка рассматривается далее как электронный «волновод».

Модель движения одиночных электронов внутри изогнутой углеродной нанотрубки

Рассмотрим полую углеродную нанотрубку, сжатую между двумя металлическими электродами, расстояние D между которыми меньше ее длины *L* в разогнутом состоянии (см. рисунок 1). Пусть Т – время дрейфового пролета одного электрона от катода до анода. Из катода в нанотрубку через равные промежутки времени $\tau < T$ инжектируются одиночные электроны с постоянной по величине скоростью $v \ll c$, где $c = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-1/2} -$ скорость света в вакууме; $\varepsilon_0 = 8,85 \text{ п}\Phi/\text{м} - электри$ ческая постоянная, $\mu_0 = 1,26$ мкГн/м – магнитная постоянная. Рассмотрим возникающее излучение электронов в нанотрубке на расстояниях больших ее длины (в так называемой дальней зоне). Поскольку электроны движутся по изогнутой траектории, то появляется электрический дипольный момент системы (нанотрубка + электроны в ней) с ненулевой второй производной по времени t. Так как электрический дипольный момент углеродной нанотрубки с движущимся в ней одиночным электроном не равен нулю, то можно пренебречь квадрупольным и магнитно-дипольным излучениями, а ограничиться рассмотрением лишь дипольного излучения [10]. Согласно [11, 18], интенсивность дипольного электромагнитного излучения электрона в трубке:

$$dI(\mathbf{n}) = \frac{1}{4\pi} \frac{\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{4\pi c^2} \left[\left(\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{p} \right) \times \mathbf{n} \right]^2 d\Omega, \qquad (1)$$

где $dI(\mathbf{n})$ – количество энергии, излучаемой движущимся внутри нанотрубки электроном за еди-



Рисунок 1 – Электрон (e^-) внутри полой углеродной нанотрубки длиной *L*, сжатой между катодом (x = 0) и анодом (x = D) и выгнутой в плоскости *ху*

Figure 1 – Electron (e^-) inside hollow carbon nanotube of length *L*, which is compressed between cathode (x = 0) and anode (x = D) and curved in the *xy* plane

ницу времени внутрь телесного угла $d\Omega$ в направлении единичного вектора **n**, направленного от электрона к наблюдателю; **p**(t) – дипольный момент движущегося в трубке одиночного электрона в момент времени t (вектор **p** направлен от электрона к аноду).

При таком выборе координатных осей x, y, z, как показано на рисунке 1, в любой момент времени трубка с электроном обладает дипольным моментом **p** с компонентами p_x и p_y . Раскрывая квадрат векторного произведения в формуле (1), и интегрируя $dl(\mathbf{n})$ в сферической системе координат ($z = r \cos \theta, x = r \sin \theta \cos \varphi, y = r \sin \theta \sin \varphi$) по всем направлениям **n**, получаем полную интенсивность электромагнитного излучения электрона, движущегося внутри нанотрубки:

$$I = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{6\pi c^2} \left| \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{p} \right|^2 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{6\pi c^2} \left[\left(\frac{d^2 p_x}{dt^2} \right)^2 + \left(\frac{d^2 p_y}{dt^2} \right)^2 \right].$$
(2)

Чтобы охарактеризовать спектр излучения электрона внутри полой нанотрубки, введем количество энергии dE_{ω} , излученной в виде электромагнитных волн с угловыми частотами $\omega = 2\pi f$ в интервале $d\omega/2\pi = df$, следуя [10, 11]:

$$dE_{\omega} = \frac{\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{3\pi c^2} \left| \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{p} \right|^2 \frac{d\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{3\pi c^2} \left[\left(\frac{d^2 p_x}{dt^2} \right)_{\omega}^2 + \left(\frac{d^2 p_y}{dt^2} \right)_{\omega}^2 \right] \frac{d\omega}{2\pi}, \quad (3)$$

где индекс ω при компонентах вектора $d^2 \mathbf{p}/dt^2$, обозначает значения их фурье-образов в точке ω (в пространстве угловых частот):

$$\left(\frac{d^2 p_x}{dt^2}\right)_{\omega}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{d^2 p_x}{dt^2}\right)^2 \exp(i\omega t) dt,$$
$$\left(\frac{d^2 p_y}{dt^2}\right)_{\omega}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{d^2 p_y}{dt^2}\right)^2 \exp(i\omega t) dt.$$
(4)

Определим $(d^2p_x/dt^2)^2_{\omega}$ для трубки. Дипольный момент одного электрона, находящегося внутри нанотрубки на расстоянии x(t) от положительного электрода (анода), равен $p_x^{(1)} = ex(t)$ (его фурье-образ $p_x^{(1)}_{\omega}$). Воспользуемся тем, что $(d^2p_x^{(1)}/dt^2)_{\omega} = -\omega^2 p_x^{(1)}_{\omega}; x_{\omega} = (dx/dt)_{\omega}/(-i\omega)$, тогда:

$$p_{x \ \omega}^{(1)} = e \int_{0}^{T} x(t) \exp(i\omega t) dt = e \int_{0}^{T} \frac{dx/dt}{-i\omega} \exp(i\omega t) dt =$$
$$= e x_{\omega} = \frac{ie}{\omega} \int_{0}^{D} \exp[i\omega h(x)/v] dx , \qquad (5)$$

где $e = 1, 6 \cdot 10^{19}$ Кл – элементарный заряд, T – время движения электрона внутри изогнутой трубки от катода к аноду, v – скорость электрона. В формуле (5) величина $h(x) = \int_0^x (1 + (y'(\xi)^2)^{1/2} d\xi) = [(D^2 + a^2\pi^2)^{1/2}/\pi] E[\pi x/D, a^2\pi^2/(D^2 + a^2\pi^2)]$ – зависимость длины пути, пройденного электроном в трубке от координаты x; D – расстояние между электродами, $y(x) = a \sin(\pi x/D)$ – уравнение, определяющее форму сжатой нанотрубки (см., например, [19]), величина a такова, что полная длина кривой равна $L = (2D/\pi) E(-a^2\pi^2/D^2)$; здесь E(n,m) и E(m) – неполный и полный эллиптические интегралы Лежандра второго рода [20, 21].

Представим дипольный момент цепочки следующих друг за другом через промежуток времени $\tau = T/N$ электронов внутри нанотрубки как сумму дипольных моментов от *N* отдельных электронов $p_{x\omega} = \sum_{k=1}^{N} p_x^{(1)}(k, \tau)$. Если в момент времени *t* дипольный момент какого-то выделенного электрона есть ex(t), то дипольный момент электрона, следующего за выделенным, равен $ex(t - \tau)$. Тогда для цепочки следующих друг за другом *N* электронов, одновременно движущихся внутри изогнутой нанотрубки, с учетом (5) получаем:

$$p_{x\omega} = \sum_{k=1}^{N} e^{\sum_{(k-1)\tau}^{T+(k-1)\tau} x[t-(k-1)\tau] \exp(i\omega t) dt} =$$
$$= \sum_{k=1}^{N} e^{\int_{0}^{T} x(t) \exp(i\omega t) \exp[i\omega(k-1)\tau] dt} =$$
$$= \sum_{k=1}^{N} \exp[i\omega(k-1)\tau] \frac{ie}{\omega} \int_{0}^{D} \exp\left(\frac{i\omega h(x)}{\upsilon}\right) dx . \quad (6)$$

где T = L/v – время пролета электрона внутри трубки между катодом и анодом.

Аналогично, для p_{y_0} получаем:

$$p_{y\omega} = \sum_{k=1}^{N} \exp[i\omega(k-1)\tau] \frac{ie}{\omega} \int_{0}^{D} \exp\left(\frac{i\omega h(x)}{\upsilon}\right) y'(x) dx.$$
(7)

Согласно формулам (6) и (7), фурье-образ дипольного момента движущихся внутри нанотрубки N электронов представляется как произведение функции $\sum_{k=1}^{N} \exp[i\omega(k-1)\tau]$ и фурьеобраза дипольного момента одного электрона $p_{x}^{(1)} = (ie/\omega) \int_{0}^{D} \exp[i\omega h(x)/v] dx$, и аналогично для $p_{y}^{(1)} \omega$. Этот способ нахождения дипольного момента электронов в трубке может быть обобщен на случай, когда промежуток времени $\tau = T/N$ не является постоянным, а изменяется известным образом от электрона к электрону [10, 22].

Из (3)–(7) для энергии, излученной *N* одновременно движущимися (дрейфующими) внутри изогнутой трубки электронами, находим

$$E(N) = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{3\pi c^2} \times \\ \times \int_{0}^{\infty} \omega^4 (|p_{x\ \omega}^{(1)}|^2 + |p_{y\ \omega}^{(1)}|^2) \frac{\sin^2(\omega\tau N/2)}{\sin^2(\omega\tau/2)} \frac{d\omega}{2\pi}.$$
 (8)

В формуле (8) устремим N формально к бесконечности (фактически для $N \gg 1$). В этом случае интенсивность излучения одного электрона, усредненная по времени в интервале $0 \le t \le T$, выражается как:

$$I = \lim_{N \to \infty} \frac{E(N)}{NT} \,. \tag{9}$$

Так как $\lim_{N\to\infty} [\sin(xN)/x] = \pi \delta(x)$, то функция $\sin(\omega \tau N/2)/\sin(\omega \tau/2)$ при $N \gg 1$ ведет себя в окрестности $\omega'_k = 2\pi k/\tau$ подобно дельта-функции

 $\pi \delta(\omega - \omega'_k)$, где k – целое положительное число. Действительно, согласно [21], имеем:

$$\lim_{\substack{N \to \infty \\ \omega \to \omega'_k}} \frac{\sin(\omega \tau N/2)}{\sin(\omega \tau/2)} = [\omega - \omega'_k = \varepsilon] =$$
$$= \lim_{\substack{N \to \infty \\ \varepsilon \to 0}} \pi \frac{\sin(\varepsilon \tau N/2)}{\pi \varepsilon \tau/2} = \pi \delta(\varepsilon \tau/2) = \frac{2\pi}{\tau} \delta(\varepsilon).$$

Преобразуем квадрат дельта-функции следующим образом (см., например, [23]):

$$\lim_{\substack{N \to \infty \\ \omega \to \omega'_k}} \frac{\sin^2(\omega \tau N/2)}{\sin^2(\omega \tau/2)} = [\omega - \omega'_k = \varepsilon] =$$

$$= \lim_{\substack{N \to \infty \\ \varepsilon \to 0}} \pi^2 \frac{\sin^2(\varepsilon \tau N/2)}{(\pi \varepsilon \tau/2)^2} =$$

$$= \pi \delta(\varepsilon \tau/2) \lim_{\substack{N \to \infty \\ \varepsilon \to 0}} \frac{\sin(\varepsilon \tau N/2)}{\pi \varepsilon \tau/2} =$$

$$= \pi \delta(\varepsilon \tau/2) \lim_{\substack{N \to \infty \\ \varepsilon \to 0}} \frac{1}{2} \int_{-N}^{N} \exp\left(i\frac{\varepsilon \tau k}{2}\right) dk = \frac{2}{\tau} N \pi \delta(\varepsilon) . (10)$$

Подставляя выражение (8) в (9) и учитывая (10), получаем (в пределе $N \gg 1$):

$$I = \sum_{k=1}^{N} I_{k} = \frac{\sqrt{\mu_{0}/\epsilon_{0}}}{3\pi c^{2} \tau T} \sum_{k=1}^{N} \omega_{k}^{4} (|p_{x}^{(1)}|^{2} + |p_{y}^{(1)}|^{2}).$$
(11)

где $\omega_k = 2\pi k / \tau$; *k* – целое положительное число.

Результаты и обсуждение

Величина мощности электромагнитного излучения на данной частоте $f_k = \omega_k/2\pi = k/\tau$ зависит от числа N электронов, одновременно и порознь движущихся внутри трубки, длины трубки L, расстояния D между катодом и анодом, дрейфовой скорости электрона v, времени T = L/vпролета одним электроном всей длины L и интервала времени $\tau = T/N$ следования электронов.

При заданных параметрах (k = 1, 2, 3, ..., N; L, v, τ) мощность излучения I_k на данной частоте ω_k зависит от расстояния D между электродами (которое отвечает за «изогнутость» трубки). Результаты расчета по формуле (11) с учетом (6) и (7) интенсивности излучения N электронами, одновременно находящимися в нанотрубке и летящими друг за другом на расстоянии $v\tau = vT/N$, в за-



Рисунок 2 – Зависимость мощности *k*-й гармоники электромагнитного излучения от расстояния *D* между электродами при следующих параметрах системы: L = 100 мкм; k = 1, 2, 3 (кривые *1*, *2*, *3*); $v = 3 \cdot 10^5$ м/с; N = 3; $\tau = T/3$

Figure 2 – Dependence of power of *k*-th harmonic of electromagnetic radiation on the distance *D* between electrodes for the following parameters of system: $L = 100 \ \mu\text{m}; k = 1$, 2, 3 (curves *l*, 2, 3); $v = 3 \cdot 10^5 \text{ m/s}; N = 3; \tau = T/3$



Рисунок 3 – Зависимость мощности *k*-й гармоники электромагнитного излучения от частоты $f_k = \omega_k/2\pi$ при параметрах системы: L = 100 мкм, D = 0.3L, $v = 3.10^5$ м/с; N = 3, 4, 5, 6 (кривые 1, 2, 3, 4). Штриховые линии проведены для удобства восприятия

Figure 3 – Dependence of power of *k*-th harmonic of electromagnetic radiation on the frequency $f_k = \omega_k/2\pi$ for the parameters of system: $L = 100 \text{ }\mu\text{m}$, D = 0.3L, $v = 3.10^5 \text{ m/s}$; N = 3, 4, 5, 6 (curves *1*, *2*, *3*, *4*). The dashed lines are guides to the eye

висимости от расстояния *D* между катодом и анодом приведены на рисунке 2.

Результаты численного расчета зависимости мощности излучения I_k на k-й гармонике от номера гармоники k приведены на рисунке 3.

Энергия излучения рассмотренной системы имеет максимумы при некоторых частотах, значения которых определяются промежутком вре-

мени $\tau = T/N$ следования друг за другом N электронов внутри полой нанотрубки. Мощность излучения при постоянной длине трубки зависит от расстояния между катодом и анодом, сжимающими трубку. Таким образом, получаем настраиваемый по мощности I и частоте $f = \omega/2\pi$ источник электромагнитного излучения.

Из рисунков 2 и 3 видно, что и спектром, и мощностью «изгибного» электромагнитного излучения можно управлять, изменяя кривизну изогнутой полой нанотрубки, а также число электронов, движущихся в ней. Отметим, что, согласно принципу Гюйгенса, суммарное электромагнитное излучение с конечного участка углеродной нанотрубки есть результат интерференции электромагнитных волн, испущенных электроном в каждой точке своего пути вдоль нанотрубки от катода к аноду [22, 24, 25]. Поэтому для четного числа электронов N внутри нанотрубки излучаемая электромагнитная энергия меньше, чем для нечетного N.

Заключение

Расчетным способом в рамках классической электродинамики показана принципиальная возможность генерации электромагнитного излучения гигагерцового диапазона одиночными электронами, движущимися внутри изогнутой диэлектрической углеродной нанотрубки.

Представляется перспективным использование таких нанотрубок в качестве микроминиатюрных источников микроволнового электромагнитного излучения в бесконтактной зондовой микроскопии для измерения локальных электрических и магнитных параметров наноструктурированных (композитных) материалов (см., например, [26]).

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция-2020» и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф18Р-253). Авторы признательны В.В. Митянку и А.И. Бенедиктовичу за обсуждения по тематике исследования.

The work was supported by the Belarusian National Research Program "Convergence-2020" and Belarusian Fund for Fundamental Research (grant No. F18R-253). The authors are grateful to V.V. Mitsianok and A.I. Benediktovich for discussions on the research topics.

Список использованных источников

1. *Харламова, М.В.* Электронные свойства одностенных углеродных нанотрубок и их производных / М.В. Харламова // УФН. – 2013. – Т. 183, № 11. – С. 1145–1174.

2. *Treacy, M.M.J.* Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes / M.M.J. Treacy, T.W. Ebbesen, J.M. Gibson // Nature. – 1996. – Vol. 381, № 6584. – P. 678–680.

DOI: 10.1038/381678a0

3. *Laird*, *E.A*. Quantum transport in carbon nanotubes / E.A. Laird [et al.] // Rev. Mod. Phys. – 2015. – Vol. 87, № 3. – P. 703–764. **DOI:** 10.1103/RevModPhys.87.703

4. *Jensen, K.* Nanotube radio / K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, A. Zettl // Nano Lett. – 2007. – Vol. 7, № 11. – P. 3508–3511. **DOI:** 10.1021/nl0721113

5. *Kleshch*, *V.I.* Electromechanical self-oscillations of carbon nanotube field emitter / V.I. Kleshch, A.N. Obraztsov, E.D. Obraztsova// Carbon. – 2010. – Vol. 48, № 13. – P. 3895–3900. **DOI:** 10.1016/j.carbon.2010.06.055

6. Nanoelectronics and information technology: Advanced electronic materials and novel devices / Ed. by R. Waser. – Weinheim : Wiley, 2012. – 1040 p.

7. *Lee*, *S.W.* Nanoelectromechanical devices with carbon nanotubes / S.W. Lee, E.E.B. Campbell // Curr. Appl. Phys. -2013. - Vol. 13, N $_{\circ}$ 8. - P. 1844–1859. **DOI:** 10.1016/j.cap.2013.02.023

8. Дьячков, П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок / П.Н. Дьячков. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 491 с.

9. Братман, В.Л. Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения / В.Л. Братман, А.Г. Литвак, Е.В. Суворов // УФН. – 2011. – Т. 181, № 8. – С. 867–874.

10. Батыгин, В.В. Сборник задач по электродинамике / В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. – М. : НИЦ РХД, 2002. – 640 с.

11. *Griffiths, D.J.* Introduction to electrodynamics / D.J. Griffiths. – Cambridge : Cambridge University Press, 2017. – xviii+600 p.

12. *Elias, D.C.* Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane / D.C. Elias [et al.] // Science. – 2009. – Vol. 323, № 5914. – P. 610–613. **DOI:** 10.1126/science.1167130

13. *Клавсюк, А.Л.* Формирование и свойства металлических атомных контактов / А.Л. Клавсюк, А.М. Салецкий // УФН. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1009–1030.

14. *Нолле, Э.Л.* Туннельный механизм фотоэффекта в активированных цезием и кислородом металлических наночастицах / Э.Л. Нолле // УФН. – 2007. – Т. 177, № 10. – С. 1133–1137.

15. Быков, В.П. Кулоновская дезынтеграция сла-

бых электронных потоков и фотоотсчеты / В.П. Быков, А.В. Герасимов, В.О. Турин // УФН. – 1995. – Т. 165, № 8. – С. 955–966.

16. *Клепиков, Н.П.* Излучение фотонов и электронно-позитронных пар в магнитном поле / Н.П. Клепиков // ЖЭТФ. – 1954. – Т. 26, № 1. – С. 19–34.

17. *Тернов, И.М.* Синхротронное излучение / И.М. Тернов // УФН. – 1995. – Т. 165, № 4. – С. 429–456.

18. *Schwartz, M.* Principles of electrodynamics / M. Schwartz. – New York : Dover, 1987. – viii+344 p.

19. *Сивухин, Д.В.* Общий курс физики. В 5 т. Т. І. Механика / Д.В. Сивухин. – М. : Физматлит; Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с.

20. *Корн, Г.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1977. – 832 с.

21. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : 1979. – 832 с.

22. Эпп, В.Я. К вопросу о когерентности синхротронного излучения / В.Я. Эпп, В.М. Седунов, В.Ф. Зальмеж // Изв. вузов. Физика. – 1988. – Т. 31, № 3. – С. 8–11.

23. Ситенко, А.Г. Теория рассеяния / А.Г. Ситенко. – Киев : Вища школа, 1975. – 256 с.

24. Болотовский, М. Низкочастотное излучение релятивистских частиц, движущихся по дуге окружности / Б.М. Болотовский, А.В. Серов // ЖЭТФ. – 1992. – Т. 102, № 5(11). – С. 1506–1511.

25. *Афанасьев, С.А.* Потоки энергии при интерференции электромагнитных волн / С.А. Афанасьев, Д.И. Семенцов // УФН. – 2008. – Т. 178, № 4. – С. 377– 384.

26. *Reznik, A.N.* Quantitative determination of sheet resistance of semiconducting films by microwave near-field probing / A.N. Reznik, E.V. Demidov // J. Appl. Phys. -2013. - Vol. 113, No 9. - P. 094501 (9 pp.). **DOI:** 10.1063/1.4794003

References

1. Kharlamova M.V. Electronic properties of pristine and modified single-walled carbon nanotubes. *Phys. Usp.*, 2013, vol. 56, no. 11, pp. 1047–1073.

DOI: 10.3367/UFNe.0183.201311a.1145

2. Treacy M.M.J., Ebbesen T.W., Gibson J.M. Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, 1996, vol. 381, no. 6584, pp. 678–680. **DOI:** 10.1038/381678a0

3. Laird E.A., Kuemmeth F., Steele G.A., Grove-Rasmussen K., Nygård J., Flensberg K., Kouwenhoven L.P. Quantum transport in carbon nanotubes. *Rev. Mod.* *Phys.*, 2015, vol. 87, no. 3, pp. 703–764.

DOI: 10.1103/RevModPhys.87.703

4. Jensen K., Weldon J., Garcia H., Zettl A. Nanotube radio. *Nano Lett.*, 2007, vol. 7, no. 11, pp. 3508–3511. **DOI:** 10.1021/nl0721113

5. Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D. Electromechanical self-oscillations of carbon nanotube field emitter. *Carbon.*, 2010, vol. 48, no. 13, pp. 3895–3900. **DOI:** 10.1016/j.carbon.2010.06.055

6. Nanoelectronics and Information Technology: Advanced Electronic Materials and Novel Devices, ed. R. Waser. Weinheim, Wiley, 2012, 1040 p.

7. Lee S.W., Campbell E.E.B. Nanoelectromechanical devices with carbon nanotubes. *Curr. Appl. Phys.*, 2013, vol. 13, no. 8, pp. 1844–1859.

DOI: 10.1016/j.cap.2013.02.023

8. Dyachkov P.N. [Electronic properties and application of nanotubes]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2015, 491 p. (in Russian).

9. Bratman V.L., Litvak A.G., Suvorov E.V. Mastering the terahertz domain: sources and applications. *Phys. Usp.*, 2011, vol. 54, no. 8, pp. 837–844.

DOI: 10.3367/UFNe.0181.201108f.0867

10. Batygin V.V., Toptygin I.N. [Collection of problems in electrodynamics]. Moscow : NIC RHD, 2002, 640 p. (in Russian).

11. Griffiths D.J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge, Cambridge University Press, 2017, xviii+600 p.

12. Elias D.C., Nair R.R., Mohiuddin T.M.G., Morozov S.V., Blake P., Halsall M.P., Ferrari A.C., Boukhvalov D.W., Katsnelson M.I., Geim A.K., Novoselov K.S. Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane. Science, 2009, vol. 323, no. 5914, pp. 610–613. **DOI:** 10.1126/science.1167130

13. Klavsyuk A.L., Saletsky A.M. Formation and properties of metallic atomic contacts. *Phys. Usp.*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 933–951.

DOI: 10.3367/UFNe.0185.201510a.1009

14. Nolle E.L. Tunneling photoeffect mechanism in metallic nanoparticles activated by cesium and oxygen. *Phys. Usp.*, 2007, vol. 50, no. 10, pp. 1079–1082. **DOI:** 10.1070/PU2007v050n10ABEH006368

15. Bykov V.P., Gerasimov A.V., Turin V.O. Coulomb disintegration of weak electron fluxes and the photocounts. *Phys. Usp.*, 1995, vol. 38, no. 8, pp. 911–921.

DOI: 10.1070/PU1995v038n08ABEH000101

16. Klepikov N.P. [Radiation of photons and electronpositron pairs in a magnetic field]. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1954, vol. 26, no. 1, pp. 19–34 (in Russian).

17. Ternov I.M. Synchrotron radiation. *Phys. Usp.*, 1995, vol. 38, no. 4, pp. 409–434.

DOI: 10.1070/PU1995v038n04ABEH000082

18. Schwartz M. Principles of Electrodynamics. New York, Dover, 1987, viii+344 p.

19. Sivukhin D.V. [General course of physics]. In 5 vols. Vol. I. [Mechanics]. Moscow, Fizmatlit; MIPT Publ., 2005, 560 p.

20. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. New York, Dover, 2000, xx+1130 p.

21. Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, ed. M. Abramowitz, I.A. Stegun. New York, Dover, 1970, xiv+1046 p.

22. Épp V.Ya., Sedunov V.M., Zal'mezh V.F. Coherence of synchrotron radiation. *Sov. Phys. J.*, 1988, vol. 31, no. 3, pp. 180–182. **DOI:** 10.1007/BF00898217

23. Sitenko A.G. [The theory of scattering]. Kiev, Vishcha shkola, 1975, 256 p. (in Russian).

24. Bolotovskii B.M., Serov A.V. Low-frequency radiation of relativistic particles moving along the arc of a circle // Sov. Phys. JETP, 1992, vol. 75, no. 5, pp. 815–817. Available at: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index/e/75/5/ p815?a=list (accessed 15.10.2018).

25. Afanas'ev S.A., Sementsov D.I. Energy fluxes during the interference of electromagnetic waves. *Phys. Usp.*, 2008, vol. 51, no. 4, pp. 355–361.

DOI: 10.1070/PU2008v051n04ABEH006502

26. Reznik A.N., Demidov E.V. Quantitative determination of sheet resistance of semiconducting films by microwave near-field probing. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 113, no. 9, pp. 094501 (9 pp.). **DOI:** 10.1063/1.4794003 УДК 681.785.554

Повышение спектрального разрешения многощелевого спектрометра с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением

Гулис И.М., Купреев А.Г.

Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 11.10.2018 Принята к печати 12.11.2018

Для спектроскопии с пространственным разрешением представляет интерес регистрация нестационарных процессов, в частности мгновенная гиперспектроскопия, позволяющая получать куб данных $I(x,y,\lambda)$ в одном акте измерения. Целью работы являлось повышение спектрального разрешения в приборах для спектроскопии с пространственным разрешением, в которых пространственная фильтрация изображения объекта осуществляется многощелевой маской, в качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка (что обеспечивает практически неизменную дисперсию в рабочем спектральном диапазоне), а проекция куба данных представляется в виде совокупности локальных спектров от отдельных фрагментов объекта.

Изображение на детекторе формируется телецентрической системой из двух объективов, настроенных на бесконечность и расположенных так, что их передние фокусы совпадают. Размещенная в точке совпадения фокусов диафрагма пропускает лишь пучки нужного порядка, что в совокупности с полосовыми светофильтрами на входе устраняет типичную для систем с дифракционной решеткой проблему отсечения всех порядков дифракции кроме рабочего. Предложенный подход реализован в двух разработанных схемных решениях спектрометров: в первом телецентрическая система построена на основе двух многолинзовых изображающих объективов, во втором – на основе внеосевых параболических зеркал.

В рамках данной работы предложены варианты оптимизации схемных решений, предусматривающие обеспечение нормального падения световых пучков на маску, а также компенсацию кривизны поля изображения, что позволяет повысить разрешение системы и расширить область применения рассмотренных схемных решений многощелевых дисперсионных спектрометров; рассмотрено схемное решение, представляющее собой синтез обоих подходов. Согласно результатам моделирования, полуширина пятен рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 10$ мкм, лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм, что соответствует пределу спектрального разрешения $\delta\lambda \leq 10$ нм на диапазоне 450–750 нм.

Ключевые слова: мгновенная гиперспектроскопия, многощелевой дисперсионный спектрометр, параболический зеркальный объектив, телецентрическая система.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гулис И.М.	Gulis I.M.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by	e-mail: gulis@bsu.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
<i>Гулис И.М., Купреев А.Г.</i>	Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
Повышение спектрального разрешения многощелевого спектрометра	[Increasing of Spectral Resolution of Multislit Imaging
с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным	Spectrometer with Diffractive Grating].
разрешением.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 4. – С. 296–305. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305	2018, vol. 9, no. 4, pp. 296–305 (in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305

Increasing of Spectral Resolution of Multislit Imaging Spectrometer with Diffractive Grating

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.

Belarusian State University, Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 11.10.2018 Accepted for publication 12.11.2018

Abstract

Registration of non-stationary processes, namely snapshot hyperspectral imaging that allows to capture data cube $I(x,y,\lambda)$ in one measurement act, is of interest for imaging spectroscopy.

The purpose of the work is increasing of spectral resolution of imaging spectrometers with spatial filtering of object image using multislit mask, where a diffractive grating is used as disperser (providing almost constant dispersion in working spectral range), and the data cube is projected on a detector as a set of local spectra from object fragments.

An image is formed on detector by a two-objective telecentric system composed from two lenses focused on infinity so that their front focuses are matched. A diaphragm in the match point allows passing only for beams of needed diffraction order, so along with a bandpass filter near the system entrance they solve a typical problem of diffractive systems – elimination of beams of all orders but a needed one. The approach is implemented in two proposed designs of spectrometers: in the first a telecentric system is based on two multi-lens imaging objectives, in the second – is based on two reflective off-axis parabolic objectives.

In this paper we proposed variants for optical design optimization: normalization of beam incidence on a mask and field curvature compensation; they allow to increase system resolution and to extend application area of multislit dispersive spectrometers; also a design being a synthesis of these two approaches is analyzed. According to simulation results, width on half-maximum in dispersion direction $\Delta l \leq 10 \ \mu m$, only for limited field points set $\Delta l \leq 15 \ \mu m$, that stands for spectral resolution limit $\delta \lambda \leq 10 \ nm$ on 450– 750 nm range.

Keywords: snapshot hyperspectroscopy; multislit dispersive spectrometer; parabolic mirror lens; telecentric system.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гулис И.М.	Gulis I.M.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by	e-mail: gulis@bsu.by
Для цитирования:	For citation:
Гулис И.М., Купреев А.Г.	Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
Повышение спектрального разрешения многощелевого спектрометра	[Increasing of Spectral Resolution of Multislit Imaging
с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным	Spectrometer with Diffractive Grating].
разрешением.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 296–305 (in Russian).
2018. – T. 9, № 4. – C. 296–305.	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-296-305	

Введение

Спектроскопия с пространственным разрешением быстро развивается и находит новые приложения в дистанционном зондировании земной поверхности (геология, экология, сельское хозяйство), медицине, биологии, криминалистике, контроле технологических процессов и др. [1-5]. Поскольку важное значение имеет анализ нестационарных объектов [3, 6, 7], а наиболее распространенные подходы спектроскопии с пространственным разрешением (последовательная регистрация спектра для участков изображения объекта [8], формирование квазимонохроматических изображений интересующей области целиком в наборе длин волн посредством переключаемых либо перестраиваемых светофильтров [9]) имеют ограниченное временное разрешение, перспективна разработка подходов для получения куба данных $I(x,y,\lambda)$ в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [10], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС).

Большинство подходов МГС основывается на регистрации проекции куба данных $I(x,y,\lambda)$ на двумерную матрицу ПЗС- или КМОПфотоприемника. Способ отображения $I(x,y,\lambda)$ на плоскость определяет информационную емкость и характеристики регистрируемого сигнала. Распространенные способы предусматривают формирование на детекторе совокупности узкополосных спектральных изображений объекта либо диспергированных изображенабора пространственных ний фрагментов проекции объекта [11, 12]. Другие, к примеру использование хромотомографического принципа (CTIS) [13], методов Фурье-спектроскопии [14], менее популярны вследствие технологической сложности реализации, ограниченной применимости для анализа объектов с резкими пространственными вариациями характеристик, а обеспечиваемый ими результат восстановления $I(x,y,\lambda)$ зачастую недостаточно устойчив к шумам.

Одним из популярных подходов МГС является формирование проекции куба данных в виде набора «локальных спектров» (ЛС) – спектров от малых фрагментов промежуточного изображения объекта, где пространственная фильтрация осуществляется матрицей микролинз [11] либо маской, содержащей множество расположенных регулярным образом отверстий (микрощелей) [12] – аналог системы входных щелей дисперсионного спектрометра. Недостатками первого подхода являются высокий вклад рассеянного света от соседних микролинз и их границ, необходимость малой расходимости пучков, формирующих изображение на микролинзовой матрице.

Этих ограничений практически лишены системы с входным отверстием в виде массива (маски) регулярно расположенных отверстий – микрощелей [12]. Однако в таких многощелевых дисперсионных спектрометрах (МДС) в качестве дисперсионных спектрометрах (МДС) в качестве дисперсионных спектрометрах (МДС) в качестве спектральном диапазоне изменение величины дисперсии системы может превышать порядок. Спектральную зависимость можно уменьшить, к примеру, использованием составных призм, скомбинированных в установке с вычитанием дисперсии [12], однако при этом снижается общая дисперсия системы.

При использовании дифракционной решетки (ДР) в качестве дисперсионного элемента вариация угловой дисперсии даже в широком спектральном диапазоне пренебрежимо мала. Однако общепринятая схема установки решетки для работы в параллельном пучке, формируемом коллиматорным объективом, неприемлема для МДС, поскольку на детекторе отображаются спектры 0-го и ± 1 -го порядков, приводя к неэффективному использованию площади фотоприемника и уменьшению информационной емкости куба данных.

Целью работы явлось повышение спектрального разрешения в приборах для спектроскопии с пространственным разрешением, в которых пространственная фильтрация изображения объекта осуществляется многощелевой маской, в качестве диспергирующего элемента используется дифракционная решетка, а проекция куба данных представляется в виде совокупности локальных спектров от отдельных фрагментов объекта.

Исключение нежелательных порядков дифракции

Разработан подход, позволяющий для повышения дисперсии в МДС использовать дифракционную решетку, устранив при этом проблему нежелательных порядков [15]. Для этого предусматривается размещение на малом расстоянии от многощелевой маски (в расходящихся пучках от микрощелей) пропускающей ДР. Можно показать, что линейная дисперсия такого спектрометра:

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{m}{t \cos\beta} \Gamma,$$
(1)

где h – расстояние от маски до решетки; Г – увеличение системы; m и β – порядок и угол дифракции; t – период решетки; таким образом, дисперсию системы можно варьировать перемещением решетки вдоль оптической оси (изменением h). Посредством дополнительной диафрагмы (см. ниже) и полосовых светофильтров отсекаются все порядки дифракции кроме одного – рабочего. Спектральный диапазон можно менять переключением полосового фильтра, без поворота диспергирующего элемента (благодаря малой длине ЛС и практически постоянной дисперсии при изменении полосы пропускания системы все ЛС параллельно сдвигаются в плоскости фотоприемника).

Одним из факторов, ограничивающих возможности такой системы, являются аберрации, вносимые решеткой при большой числовой апертуре проходящих пучков. Однако проведенная оценка показывает, что при числовой апертуре NA = 0,05 для решетки 300 штрих/мм верхний предел размеров аберрационного пятна рассеяния не превышает 10 мкм, что допустимо в контексте решаемой задачи.

Формирование изображения на детекторе из совокупности дифрагированных пучков после ДР осуществляется телецентрической системой из двух изображающих объективов, настроенных на бесконечность и расположенных «встречно» – так, что их передние фокусы совпадают. В точке совпадения фокусов располагается диафрагма, пропускающая только пучки нужного порядка.

Маска представляет собой набор рядов микрощелей со сдвигом относительно предыдущего ряда на ¹/₄ расстояния между щелями в ряду (через 4 ряда расположение щелей в ряду повторяется). Размеры щели 5×20 мкм, расстояние между щелями в ряду 400 мкм (т.е. длина ЛС не должна превышать 400 мкм), что обеспечивает разрешение до 30 спектральных элементов при ширине аберрационно уширенного изображения щели при монохроматическом освещении $\Delta l_{aббеp} \approx 13$ мкм.

Для рабочего диапазона 400–700 нм это эквивалентно спектральному разрешению $\delta\lambda \approx 10$ нм, достаточному для регистрации с минимальными

искажениями спектров отражения земной поверхности и многих биологических объектов (как правило, в таких спектрах отсутствуют структурные элементы с δλ < 30 нм).

Для формирования промежуточного изображения объекта на многощелевой маске может использоваться любая изображающая система, обеспечивающая достаточно малые числовые апертуры падающих пучков от отдельных точек объекта. Как показывает оценка, для существенного уменьшения аберраций, вносимых решеткой при работе в неколлимированных пучках, достаточна $NA \leq 0,05$. Такая апертура может быть обеспечена, к примеру, многими микроскопными объективами при входной $NA \approx 0,5$ и более чем десятикратном увеличении, а также объективами астрономических телескопов.

Схемные решения многощелевых дисперсионных спектрометров

Предложенные в работах [15, 16] схемные решения многощелевых спектрометров с дифракционной решеткой представлены на рисунке 1. Целью настоящей работы является детальный анализ достигаемого с использованием этих схем пространственного и спектрального разрешения, определяющихся, в первую очередь, размерами аберрационно-лимитированных пятен рассеяния.

В первом случае (рисунок 1a) телецентрическая система сформирована из двух изображающих объективов, настроенных на бесконечность (моделировались фотообъективы Nikon Nikkor AF 50 mm 1.4D) [15]. Поскольку после микроскопа оси пучков от разных точек поля неколлинеарны, трансформация их в набор параллельных пучков перед падением на многощелевую маску обеспечивается плоско-выпуклой линзой, расположенной непосредственно перед маской и поэтому практически не вносящей искажений в получаемое на фотодетекторе изображение.

Для оценки изображающих характеристик системы проведено численное моделирование в программе ZEMAX®. Для формирования изображения на маске использована модель 4-линзового микроскопного объектива (МО), диаметр рабочего поля изображения 16 мм, что соответствует диаметру поля в предметной плоскости $MO \approx 1,9$ мм (увеличение $\approx 8,5$ раз). Для коллинеаризации пучков от разных точек поля использована плоско-выпуклая линза из стекла BK7 (n = 1,517) радиусом 85 мм и толщиной 1 мм.



Рисунок 1 – Оптическая схема многощелевого дисперсионного спектрометра на основе линзовых объективов *Nikon Nikkor AF* 50 mm (*a*) и внеосевых параболических зеркальных объективов (*b*); точки поля (центр и *C*, *S*, *D*), для которых получены параметры пятен рассеяния (*c*): 1 – плоско-выпуклая линза для коллинеаризации падающих пучков; 2 – многощелевая маска; 3 – пропускающая дифракционная решетка; 4, 6 – объектив *Nikon Nikkor AF* 50 mm; 5 – диафрагма; 7 – детектор; 8 – плоское зеркало; 9, 10 – внеосевой параболический объектив; *m* – порядок дифракции. Направление дисперсии – ось *у*

Figure 1 – Design of multislit dispersive spectrometer based on refractive objectives *Nikon Nikkor AF* 50 mm (*a*) and parabolic off-axis reflective objectives (*b*); points on object field where spot parameters were evaluated (*c*): 1 – plano-convex lens for collinearization of incident beams; 2 – multislit mask; 3 – transmissive diffractive grating; 4, 6 – objective *Nikon Nikkor AF* 50 mm; 5 – diaphragm; 7 – detector; 8 – plane mirror; 9, 10 – parabolic off-axis objective; *m* – diffraction order. Dispersion is along *y*-axis

Моделирование проводилось для спектрального диапазона 405–700 нм (450 мкм на детекторе, ось пучка 550 нм параллельна оптической оси системы), толщина подложки маски и дифракционной решетки 2 мм (обе – стекло ВК7). Полуширина пятен рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 15$ мкм (для края спектрального диапазона $\Delta l \leq 20$ мкм), что соответствует спектральному разрешению $\delta \lambda \leq 10$ нм (и $\delta \lambda \leq 14$ нм для края).

Из-за использования линзовых объективов спектральный рабочий диапазон ограничен видимой областью, а качество изображения снижается за счет хроматических аберраций. Поэтому было разработано схемное решение на основе внеосевых параболических зеркальных объективов (рисунок 1*b*), далее – референтная система [16], которые обеспечивают высокое качество изображения при работе в параллельных пучках при малом поле изображения относительно фокусного расстояния объектива. В нашем случае размер поля ограничен 16 мм, а фокусное расстояние определяется требованиями к габаритам системы и не может быть существенно увеличено. Однако небольшая числовая апертура пучков после микроскопа (NA = 0,042, относительное отверстие 1:12) на входе в многощелевую маску позволяет ожидать, что аберрации зеркал и размеры пятен рассеяния будут невелики даже при относительно протяженном поле изображения.

Моделирование рефлективной системы (рисунок 1*b*) проводилось в рабочем спектральном диапазоне 450–750 нм, использована пропускающая дифракционная решетка 300 штрих/мм, материал подложки маски и решетки – кварц (n = 1,458). Параметры объективов 9 и 10 соответствуют параметрам промышленно выпускаемого объектива: угол отклонения оптической оси $\gamma = 30^{\circ}$, диаметр рабочей области 50,8 мм, радиус кривизны 254 мм, эффективное фокусное расстояние 136,12 мм, фокусное расстояние образующей параболы 127 мм. Штриховая структура решетки и покрытие маски располагаются на поверхностях, обращенных к зеркалу 8, что делает возможным нанесение светопоглощающего покрытия на непрозрачную часть маски для уменьшения рассеянного света в системе.

Расходящиеся после МО пучки от разных точек поля коллинеаризуются кварцевой плоско-выпуклой линзой 1 (радиус 80 мм). Оптическая ось системы «объект – МО» наклонена к оси линзы, решетки и маски (угол α на рисунках 1*a*, *b*) для того, чтобы обеспечить выход дифрагированных пучков центральной длины волны рабочего диапазона (600 нм) по нормали к ДР (соответственно, нахождение всех точек входного поля в фокальной плоскости параболического объектива).

Результаты численного моделирования показывают, что полуширина пятен рассеяния в направлении дисперсии преимущественно $\Delta l \leq 10$ мкм, лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм, что соответствует $\delta \lambda \leq 10$ нм (в данном случае рабочий спектральный диапазон 300 нм развертывается на $\approx 360-400$ мкм детектора, линейная дисперсия $\approx (1,2-1,3) \times 10^{-3}$ мм/нм). Полуширина в направлении, ортогональном дисперсии, не превышает 25–30 мкм.

Совершенствование оптической системы

Представленное в [16] схемное решение пригодно для макетирования и реализации МДС, однако существуют возможности его улучшения.

В рассматриваемой оптической системе объектив микроскопа работает с наклонным полем объекта и изображения (рисунок 1*a*, *b*), однако, как правило, микроскопные объективы оптимизированы для работы с определенным рабочим отрезком, поэтому в промежуточной плоскости аберрационное уширение кружков рассеяния для части точек поля может быть существенным. Кроме того, в ряде случаев (например, при использовании телескопных объективов) получить наклонное поле промежуточного изображения затруднительно. Таким образом, вариант оптической системы с нормальным падением пучков на маску представляет интерес, и для него было проведено численное моделирование. В системе с нормальным падением на маску, которое приводит к наклону поля (наклон поля изображения относительно перпендикулярного к оптической оси положения около 10°), полуширина пятен рассеяния увеличивается незначительно – до 10 мкм (в отдельных точках поля до 15 мкм), длина спектра уменьшается менее чем на 5 % (рисунок 2). Малая чувствительность к глубине поля объекта, по-видимому, обусловлена малой числовой апертурой пучков. Уменьшение длины спектра обусловлено неколлинеарностью (схождением) оптических осей диспергированных пучков с разными длинами волн.

Вторым направлением оптимизации является исправление неплоскостности поля изображения. Для уменьшения кривизны использована плоско-выпуклая линза, расположенная непосредственно перед детектором. Согласно расчету, для компенсации кривизны в данной системе (радиус кривизны поля изображения ≈ 100 мм) достаточно использовать кварцевую линзу радиусом 30 мм. Численное моделирование показало, что при этом полуширина пятен рассеяния существенно уменьшается - до 7-10 мкм (рисунок 3). Из иллюстрации видно, что при использовании линзы длина спектральной развертки на детекторе несколько отличается для разных точек поля. По-видимому, это обусловлено различным локальным диспергирующим эффектом линзы.

Наконец, было рассмотрено схемное решение, сочетающее две предложенные выше оптимизации: реализацию нормального падения пучков на маску и коррекцию кривизны поля изображения. Численное моделирование показало, что удовлетворительные размеры пятен рассеяния достигаются при использовании корректирующей линзы с параметрами, аналогичными линзе из схемы без наклона плоскости изображения (в нашем случае R = 30 мм). Согласно результатам моделирования, полуширина пятен рассеяния в направлении дисперсии $\Delta l \leq 10$ мкм, лишь в отдельных точках поля $\Delta l \leq 15$ мкм. Вследствие того, что дисперсия в данной системе несколько выше, чем в исходной рефлективной (максимальная величина по полю $\approx 1.5 \times 10^{-3}$ мм/нм достигается лишь на одном краю поля, длина ЛС при этом 460 мкм), $\delta \lambda \le 10$ нм для всего поля.



Рисунок 2 – Результаты моделирования сечения изображений микрощелей в направлении дисперсии референтной системы (штриховая линия) и системы с наклоном поля изображения $10,1^{\circ}$ относительно плоскости, перпендикулярной к оптической оси (сплошная линия), для центра поля объекта (*a*), краев поля в точках D(b), S(c), C(d) согласно рисунку 1. Длины волн слева направо: 750, 680, 600, 520, 450 нм

Figure 2 – Results of modeling of microslit image cross-sections in dispersion direction for a reference system (dashed line) and a system with image field tilted 10.1° relatively to a plane, perpendicular to optical axis (solid line), for the object field center (*a*), field edges in points D(b), S(c), C(d) according to Figure 1. Wavelength from left to right: 750, 680, 600, 520, 450 nm



Рисунок 3 – Результаты моделирования сечения изображений микрощелей в направлении дисперсии для референтной системы (штриховая линия) и системы с коррекцией кривизны поля плоско-выпуклой кварцевой линзой R = 30 мм (сплошная линия) для центра поля объекта (*a*), краев поля в точках D(b), S(c), C(d) согласно рисунку 1. Длины волн слева направо: 750, 680, 600, 520, 450 нм

Figure 3 – Results of modeling of microslit image cross-sections in dispersion direction for a reference system (dashed line) and a system with field curvature correction by a plano-convex silica lens R = 30 mm (solid line) for the object field center (*a*), field edges in points D(b), S(c), C(d) according to Figure 1. Wavelength from left to right: 750, 680, 600, 520, 450 nm

Была также проанализирована возможность коррекции спектральной комы использованием в схеме с дифракционной решеткой призмы с малым углом при вершине [17, с. 398]. Однако моделирование показало, что для данной оптической системы более существенный вклад по сравнению с уширением из-за спектральной комы вносит наклон плоскости развертки ЛС относительно плоскости детектора. Он может превышать 40°, что приводит к увеличению полуширины пятен рассеяния в направлении дисперсии до 15–17 мкм; кроме того, призма вносит дополнительный астигматизм, уширяя пятна рассеяния в направлении, ортогональном направлению дисперсии.



Рисунок 4 – Результаты моделирования сечения изображений микрощелей в направлении дисперсии для референтной системы (штриховая линия) и системы с коррекцией посредством плоско-выпуклой кварцевой линзы R = 30 мм и наклонным полем изображения (сплошная линия) для центра поля объекта (*a*), краев поля в точках D(b), S(c), C(d) согласно рисунку 1. Длины волн слева направо: 750, 680, 600, 520, 450 нм.

Figure 4 – Results of modeling of microslit image cross-sections in dispersion direction for a reference system (dashed line) and a system with field curvature correction by a plano-convex silica lens R = 30 mm and tilted image field (solid line) for the object field center (*a*), field edges in points *D* (*b*), *S* (*c*), *C* (*d*) according to Figure 1. Wavelength from left to right: 750, 680, 600, 520, 450 nm

На основании результатов моделирования можно заключить, что как рефрактивное, так и рефлективное схемное решение пригодны для реализации на их основе МДС. С технологической точки зрения оба построены на доступной элементной базе. Рефрактивная система компактнее, однако имеет более ограниченный спектральный рабочий диапазон. Рефлективная система теоретически позволяет расширить спектральный диапазон до $\approx 0,3-2$ мкм (полоса пропускания кварцевых элементов), спектральное разрешение в ней несколько превосходит достигнутое в рефрактивной.

Благодаря использованию дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента оба схемных решения обеспечивают единовременную регистрацию куба данных с достаточно большой и практически неизменной в рабочем спектральном диапазоне дисперсией. Продольный сдвиг решетки позволяет варьировать дисперсию в широких пределах (соответствующим образом меняется и спектральный рабочий диапазон), что обеспечивает функциональную гибкость системы. Другой способ перестройки рабочего диапазона – замена дифракционной решетки (в работе [16] приведены параметры моделируемой системы при использовании разных решеток).

Заключение

Проанализированы подходы к повышению спектрального разрешения многощелевых дисперсионных спектрометров с дифракционными решетками. Схемные решения обеспечивают практическую неизменность дисперсии в широком рабочем диапазоне, надежное отсечение нежелательных порядков дисперсии, повышение пространственного разрешения за счет устранения наклона плоскости изображения объекта к плоскости многощелевой маски (что позволяет использовать в качестве входных объективы с малой глубиной резкости, телескопные объективы), оптимизацию спектрального разрешения за счет снижения кривизны поля изображения.

Схемные решения адаптированы для макетирования, параметры оптических элементов выбирались с учетом доступности для изготовления либо приобретения. Приборы могут быть использованы для мгновенной гиперспектроскопии объектов земной поверхности, биомедицинских приложений.

Список использованных источников

1. Xie, Y. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review / Y. Xie, Z. Sha, M. Yu // Journ. of Plant Ecology. – 2008. – Vol. 1, no. 1. – P. 9–23. **DOI:** https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005

2. *Lu*, *G*. Medical hyperspectral imaging: a review / G. Lu, B. Fei // Journ. of Biomed. Optics. – 2014. – Vol. 19, no. 1. – P. 010901-1–010901-23. **DOI:** https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901

3. *Thompson, D.R.* Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane / D.R. Thompson [et al.] // Atmos. Meas. Tech. – 2015. Vol. 8, no. 10. – P. 4383–4397. **DOI:** https://doi.org/10.5194/amt-8-4383-2015

4. *Kuula, J.* Using VIS/NIR and IR spectral cameras for detecting and separating crime scene details / J. Kuula [et al.] // Proc. SPIE. – 2012. – Vol. 8359. – P. 83590P-1– 83590P-11. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.918555

5. *Qin, J.* Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality / J. Qin [et al.] // Journ. of Food Engineering. – 2013. – Vol. 118, no. 2. – P. 157–171. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001

6. *Gao*, *L*. Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy – a review of data acquisition / L. Gao, R.T. Smith // Journ. of Biophotonics. – 2015. – Vol. 8, no. 6. – P. 441–456. **DOI:** https://doi.org/10.1002/jbio.201400051

7. *Lefebvre, J.* Real Time Hyperspectroscopy for Dynamical Study of Carbon Nanotubes / J. Lefebvre // ACS Nano. – 2016. – Vol. 10, no. 10. – P. 9602–9607. **DOI:** https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05077

8. *Mouroulis, P.* Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic

and spatial information / P. Mouroulis, R.O. Green, T.G. Chrien // Appl. Opt. – 2000. – Vol. 39, no. 13. – P. 2210–2220. **DOI:** https://doi.org/10.1364/AO.39.002210

9. *Tran, C.D.* Principles, Instrumentation, and Applications of Infrared Multispectral Imaging, An Overview / C.D. Tran // Analytical Letters. – 2005. – Vol. 38, no. 5. – P. 735–752. **DOI:** https://doi.org/10.1081/AL-200047754

10. *Hagen, N.* Review of snapshot spectral imaging technologies / N. Hagen, M.W. Kudenov // Opt. Engineering. – 2013. – Vol. 52, no. 9. – P. 090901-1–090901-23. **DOI:** https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901

11. *Sugai, H.* The Kyoto tridimensional spectrograph II on Subaru and the University of Hawaii 88-in telescopes / H. Sugai [et al.] // Publ. Astron. Soc. Pac. – 2010. – Vol. 122, no. 887.–P. 103–118. **DOI**: https://dx.doi.org/10.1086/650397

12. *Bodkin, A.* Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera / A. Bodkin [et al.] // Proc. SPIE. – 2009. – Vol. 7334. – P. 73340H-1–73340H-11. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.818929

13. Volin, C.E. Portable computed-tomography imaging spectrometer / C.E. Volin [et al.] // Proc. SPIE. – 1996. – Vol. 2819. – P. 224–230. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.258068

14. *Kudenov, M.W.* Compact real-time birefringent imaging spectrometer / M.W. Kudenov, E.L. Dereniak // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20, no. 16. – P. 17973–17986. **DOI:** https://doi.org/10.1364/OE.20.017973

15. *Гулис, И.М.* Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, И.Д. Демидов, Е.С. Воропай // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 3. – С. 4–11.

16. Гулис, И.М. Многощелевой спектрометр с дифракционной решеткой и зеркальными объективами для спектроскопии с пространственным разрешением / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, И.Д. Демидов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2018. – № 2. – С. 4–10.

17. *Schroeder, D.J.* Astronomical optics / D.J. Schroeder. – 2nd edition. – San Diego : Academic Press, 1999. – 478 p.

References

1. Xie Y., Sha Z., Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 9–23. **DOI:** https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005

2. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 010901-1–010901-23.
DOI: https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.1.010901

3. Thompson D.R., Leifer I., Bovensmann H., Eastwood M., Fladeland M., Frankenberg C., Gerilowski K., Green R.O., Kratwurst S., Krings T., Luna B., Thorpe A.K. Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane. *Atmospheric Measurement* *Techniques*, 2015, vol. 8, no. 10, pp. 4383–4397. **DOI:** https://doi.org/10.5194/amt-8-4383-2015

4. Kuula J., Pölönen I., Puupponen H., Selander T., Reinikainen T., Kalenius T., Saari H. Using VIS/NIR and IR spectral cameras for detecting and separating crime scene details. *Proceedings SPIE*, 2012, vol. 8359, pp. 83590P-1– 83590P-11. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.918555

5. Qin J., Chao K., Kim M.S., Lu R., Burks T.F. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*, 2013, vol. 118, no. 2, pp. 157–171. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001

6. Gao L., Smith R.T. Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy – a review of data acquisition. *Journal of Biophotonics*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 441–456. **DOI:** https://doi.org/10.1002/jbio.201400051

7. Lefebvre J. Real Time Hyperspectroscopy for Dynamical Study of Carbon Nanotubes. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, no. 10, pp. 9602–9607. **DOI:** https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05077

8. Mouroulis P., Green R.O., Chrien T.G. Design of pushbroom imaging spectrometers for optimum recovery of spectroscopic and spatial information. *Applied Optics*, 2000, vol. 39, no. 13, pp. 2210–2220. **DOI:** https://doi.org/10.1364/AO.39.002210

9. Tran C.D. Principles, Instrumentation, and Applications of Infrared Multispectral Imaging, An Overview. *Analytical Letters*, 2005, vol. 38, no. 5, pp. 735– 752. **DOI:** https://doi.org/10.1081/AL-200047754

10. Hagen N., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, no. 9, pp. 090901-1–090901-23.

DOI: https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901

11. Sugai H., Hattori T., Kawai A., Ozaki S., Hayashi T., Ishigaki T., Ishii M., Ohtani H., Shimono A., Okita Y., Matsubayashi K., Kosugi G., Sasaki M., Takeyama N. The Kyoto tridimensional spectrograph II on Subaru and the University of Hawaii 88-in telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2010, vol. 122, no. 887, pp. 103–118. **DOI:** https://dx.doi.org/10.1086/650397

12. Bodkin A., Sheinis A., Norton A., Daly J., Beaven S., Weinheimer J. Snapshot hyperspectral imaging – the hyperpixel array camera. *Proceedings SPIE*, 2009, vol. 7334, pp. 73340H-1–73340H-11. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.818929

13. Volin C.E., Gleeson T.M., Descour M.R., Dereniak E.L. Portable computed-tomography imaging spectrometer. *Proceedings SPIE*, 1996, vol. 2819, pp. 224–230. **DOI:** https://doi.org/10.1117/12.258068

14. Kudenov M.W., Dereniak E.L. Compact real-time birefringent imaging spectrometer. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 16, pp. 17973–17986. **DOI:** https://doi.org/10.1364/OE.20.017973

15. Gulis I.M., Kupreyeu A.G., Demidov I.D., Voropay E.S. [Multislit diffraction grating spectrometer for imaging spectroscopy]. *J. Belarus. State Univ. Phys.*, 2017, no. 3, pp. 4–11 (in Russian).

16. Gulis I.M., Kupreyeu A.G., Demidov I.D. [Multislit diffraction grating spectrometer with mirror lens for imaging spectroscopy]. *J. Belarus. State Univ. Phys.*, 2018, no. 2, pp. 4–10 (in Russian).

17. Schroeder D.J. Astronomical optics, 2nd edition. San Diego, Academic Press, 1999, 478 p.

Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов

Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Чигирь Г.Г., Филипеня В.А., Горушко В.А.

Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 14.09.2018 Принята к печати 30.10.2018

Ключевым элементом, определяющим стабильность полупроводниковых приборов, является подзатворный диэлектрик. По мере уменьшения его толщины в процессе масштабирования растет совокупный объем факторов, определяющих его электрофизические свойства. Целью данной работы являлась разработка экспрессного метода контроля времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика и исследование влияния быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин и подзатворного диэлектрика на его надежность.

В работе предложен метод оценки показателей надежности подзатворных диэлектриков по результатам испытаний тестовых МДП-структур путем подачи на затвор ступенчато-нарастающего напряжения до фиксации момента пробоя структуры при разных скоростях развертки напряжения при измерении вольт-амперных характеристик. Предложенная модель позволяет реализовать экспрессный метод оценки надежности тонких диэлектриков непосредственно в процессе производства кристаллов микросхем.

На основании данного метода проведены исследования влияния быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин КЭФ 4,5, КДБ 12 и сформированного на них путем пирогенного окисления подзатворного диэлектрика на время наработки его на отказ. Показано, что быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин с последующим их пирогенным окислением приводит к увеличению времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика в среднем с 12,9 до 15,9 года (в 1,23 раза). Термообработка исходных кремниевых пластин и подзатворного диэлектрика позволяет увеличить время наработки на отказ до 25,2 года, т.е. в 1,89 раза больше, чем при стандартном процессе пирогенного окисления, и в 1,5 раза больше, чем при применении быстрой термообработки только исходных кремниевых пластин.

Ключевые слова: интегральная микросхема, подзатворный диэлектрик, заряд пробоя, время наработки на отказ.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313

Адрес для переписки: Пилипенко В.А. Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск 220108, Беларусь e-mail: office@bms.by	Address for correspondence: Pilipenko V.A. JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Kazintsa I.P. str., 121A, Minsk 220108, Belarus e-mail: office@bms.by
Для цитирования:	For citation:
Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Чигирь Г.Г., Филипеня В.А., Горушко В.А.	Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A.,
Экспрессный контроль надежности подзатворного	Gorushko V.A.
диэлектрика полупроводниковых приборов.	[Reliability Express Control of the Gate Dielectric
Приборы и методы измерений.	of Semiconductor Devices].
2018. – T. 9, № 4. – C. 306–313.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313	2018, vol. 9, no. 4, pp. 306–313 (in Russian).
	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313

Reliability Express Control of the Gate Dielectric of Semiconductor Devices

Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A., Gorushko V.A.

JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Kazintsa I.P. str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 14.09.2018 Accepted for publication 30.10.2018

Abstract

The key element determining stability of the semiconductor devices is a gate dielectric. As its thickness reduces in the process of scaling the combined volume of factors determining its electrophysical properties increases. The purpose of this paper is development of the control express method of the error-free running time of the gate dielectric and study the influence of the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers and gate dielectric on its reliability.

The paper proposes a model for evaluation of the reliability indicators of the gate dielectrics as per the trial results of the test MDS-structures by means of applying of the ramp-increasing voltage on the gate up to the moment of the structure breakdown at various velocities of the voltage sweep with measurement of the IV-parameters. The proposed model makes it possible to realize the express method of the reliability evaluation of the thin dielectrics right in the production process of the integrated circuits.

On the basis of this method study of the influence of the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers of the KEF 4.5, KDB 12 wafers and formed on them by means of the pyrogenic oxidation of the gate dielectric for the error-free running time were performed. It is shown, that rapid thermal treatment of the initial silicon wafers with their subsequent oxidation results in increase of the error-free running time of the gate dielectric on average from 12.9 to 15.9 years (1.23 times greater). Thermal treatment of the initial silicon wafers and gate dielectric makes it possible to expand the error-free running time up to 25.2 years, i.e. 1.89 times more, than in the standard process of the pyrogenic oxidation and 1.5 times more, than under application of the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers only.

Keywords: integrated circuit, gate dielectric, breakdown charge, error-free running time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313

Адрес для переписки: Пилипенко В.А. Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск 220108, Беларусь e-mail: office@bms.by	Address for correspondence: Pilipenko V.A. JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Kazintsa I.P. str., 121A, Minsk 220108, Belarus e-mail: office@bms.by
Для цитирования:	For citation:
Солодуха В.А., Пилипенко В.А., Чигирь Г.Г., Филипеня В.А., Горушко В.А.	Solodukha V.A., Chigir G.G., Pilipenko V.A., Filipenya V.A.,
Экспрессный контроль надежности подзатворного	Gorushko V.A.
диэлектрика полупроводниковых приборов.	[Reliability Express Control of the Gate Dielectric
Приборы и методы измерений.	of Semiconductor Devices].
2018. – T. 9, № 4. – C. 306–313.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-306-313	2018, vol. 9, no. 4, pp. 306–313 (in Russian).
	DOL : 10 21122/2220-9506-2018-9-4-306-313

Введение

Одним из важнейших параметров подзатворного диэлектрика, в особенности используемого в электронной элементной базе для аэрокосмической техники, является время его наработки на отказ. Благодаря методу контроля данного параметра, появляется реальная возможность проводить отбраковку полупроводниковых приборов на этапе их изготовления [1–6].

В настоящее время для определения надежности подзатворного диэлектрика и времени наработки на отказ МДП-приборов используется метод, основанный на измерении величины заряда пробоя [7]. В процессе эксплуатации приборов к диэлектрику приложено электрическое напряжение и через него протекает ток, под действием которого происходит деградация его структуры, приводящая к пробою диэлектрика. От начала эксплуатации прибора до отказа через диэлектрик протекает определенный заряд. Если на этапе изготовления микросхемы провести измерение величины заряда пробоя диэлектрического слоя, то она будет характеризовать надежность диэлектрика, а следовательно, и время его наработки на отказ. Данный метод позволяет фиксировать величину заряда пробоя диэлектрического слоя и косвенно оценивать величину времени наработки на отказ. Большая величина заряда пробоя является необходимым, но не достаточным условием для увеличения времени наработки на отказ. На практике в ряде случаев при одинаковой величине заряда пробоя имеет место разное время наработки на отказ. Это приводит к тому, что точность у данного метода невелика и он пригоден лишь для косвенной оценки данного параметра.

Более эффективным методом определения времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика МДП-микросхемы является метод, включающий испытание тестовой МДП-структуры путем приложения постоянного электрического напряжения к подзатворному диэлектрику до пробоя структуры и расчета времени наработки на отказ [8]. Данный метод позволяет определять время наработки на отказ подзатворного диэлектрика МДП-микросхемы в широком диапазоне времени и таким образом оценивать реальную надежность полупроводниковых приборов.

Существенным недостатком данного метода является необходимость проведения специальных экспериментальных работ для определения величины коэффициента ускорения при испытаниях с достаточной точностью, которая зависит от константы (β), обусловленной процессом деградации диэлектрика при приложении электрического напряжения и энергией активации данного процесса (Е_a). Эти величины являются постоянными только для одного фиксированного элемента МДП-микросхемы, а в целом они зависят от концентрации загрязняющих примесей и ряда факторов, учитывающих изменчивость параметров технологических процессов. Кроме того, для определения величины В необходимо предварительно провести испытания при трех различных напряжениях на затворе МДП-структур, превышающих напряжение эксплуатации полупроводниковых приборов. Испытания при каждом напряжении необходимо проводить на требуемой выборке тестовых структур. После проведения всех испытаний при трех напряжениях проводится статистическая обработка данных с определением величины β. Такая же статистическая процедура испытаний требуется для определения величины энергии активации Е. После испытаний выборки тестовых структур при трех повышенных температурах проводится статистическая обработка данных с определением величины Е.

Процедура определения величин β , E_a является достаточно трудоемкой и длительной. Учитывая изменчивость параметров технологических процессов, ее требуется повторять достаточно часто для обеспечения необходимой точности определения времени наработки на отказ. Это приводит к тому, что данный способ можно использовать как аттестационный, например, один раз в полугодие. В условиях серийного производства возникает задача оценки надежности каждой партии пластин. В пределах одной партии параметры надежности кристаллов интегральных микросхем примерно одинаковы. Проведя оценку их надежности на одной пластине, можно сделать заключение о надежности всей партии.

В связи с этим целью работы являлась разработка эффективного экспрессного метода определения времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика в технологическом процессе создания полупроводниковых приборов.

Экспрессный метод оценки времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика

Для решения данной задачи проводился расчет времени наработки на отказ подзатворного
диэлектрика, базирующийся на результатах испытаний тестовых МДП-структур путем подачи на затвор ступенчато-нарастающего напряжения до пробоя структуры при разных скоростях развертки [9–10]. Такой подход основывается на экспоненциальной зависимости времени наработки на отказ от приложенного напряжения. В процессе эксплуатации полупроводниковый прибор работает при напряжении U_{op} и время наработки на отказ $T_{error-free}$ в этом случае может быть рассчитано из соотношения:

$$\mathbf{T}_{error-free} = A_0 \cdot \exp\left(-\beta \cdot U_{op}\right),\tag{1}$$

где A_0 , β – константы.

Для характеризации ступенчато-нарастающего напряжения вводится понятие скорости развертки, под которой понимается величина K_{sweep} (B/c), равная:

$$K_{sweep} = \frac{\Delta U}{\Delta t_{step}},\tag{2}$$

где ΔU – величина ступеньки или шаг по напряжению при развертке, В; Δt_{step} – длительность ступеньки напряжения, с.

В процессе испытаний за время действия одной ступеньки Δt_{step} в соответствии с выражениями (1) и (2) происходит деградация, эквивалентная деградации в условиях эксплуатации за время $\Delta T_{error-firee}$:

$$\Delta T_{error - free} = \Delta t_{step} \cdot \exp\left[\beta (U - U_{op})\right] =$$

$$= \frac{\Delta U}{K_{sweep}} \cdot \exp\left[\beta (U - U_{op})\right].$$
(3)

Проведя интегрирование по всем ступенькам напряжения, получаем:

$$T_{error-free} = \int_{U_{ini}}^{U_{break}} \frac{\exp(-\beta \cdot U_{op})}{K_{step}} \cdot \exp(\beta \cdot U) dU =$$

$$= \frac{\exp(-\beta \cdot U_{op})}{K_{sweep}} \cdot \int_{U_{ini}}^{U_{break}} \exp(\beta \cdot U) dU =$$

$$= \frac{\exp(-\beta \cdot U_{op})}{K_{sweep} \cdot \beta} \cdot \left[\exp(\beta \cdot U_{break}) - \exp(\beta \cdot U_{ini})\right] \approx$$

$$\approx \frac{\exp\left[\beta \cdot (U_{break} - U_{op})\right]}{K_{sweep} \cdot \beta}.$$
(4)

Входящая в (4) величина β рассчитывается по данным двух измерений, проведенных с различной скоростью развертки, в соответствии с выражением:

$$\beta = \frac{1}{U_{break1} - U_{break2}} \cdot ln \frac{K_{sweep1}}{K_{sweep2}},$$
(5)

где U_{op} – напряжение эксплуатации микросхемы, В; U_{ini} – начальное напряжение при измерении пробивного напряжения ($U_{ini} << U_{op}$), В; U_{break1} – напряжение пробоя диэлектрика при первой скорости развертки, В; U_{break2} – напряжение пробоя диэлектрика при второй скорости развертки, В; K_{sweep1} – первая скорость развертки, В/с.

В соответствии с данным методом испытания проводят при температуре эксплуатации полупроводникового прибора, а электрическое напряжение прикладывают в режиме ступенчато-нарастающего напряжения при постоянной длительности всех ступенек от 10 мс до 1 с, начиная с величины напряжения U_{ini} (оно значительно меньше напряжения эксплуатации U_{op}). После воздействия каждой ступеньки напряжения проводят измерение величины тока утечки I_{ymi} МДП-структуры. Испытание прекращают при возникновении пробоя структуры, определяемого по величине измеренного тока $I_{ymi+1} > 5 \cdot I_{ymi}$. Расчет времени наработки на отказ $T_{error-free}$ производят по формулам (4, 5).

При использовании длительности импульса от 10 мс до 1 с величина напряжения быстро нарастает до больших значений и пробой любой МДП-структуры неизбежен. Снижение длительности импульса (менее 10 мс) существенно уменьшает точность определения времени наработки на отказ. Это обусловлено тем, что в начале воздействия каждого импульса имеют место переходные процессы, в частности происходит зарядка емкости диэлектрика, что приводит к увеличению погрешности измерений. При увеличении длительности импульса (более 1 с) время испытаний увеличивается до нескольких минут и более, что не позволяет оперативно набрать статистику измерений (например, произвести измерения 50 шт. МДП-структур) и сделать заключение о надежности диэлектрика. Выбор величины шага ступеньки составляет 0,1 В, что обусловобеспечением необходимой точности лено измерений. Погрешность контроля в основном

определяется последней ступенькой напряжения, на которой происходит пробой диэлектрика. Возникает неопределенность: какую часть ступеньки необходимо учитывать при расчете величины напряжения пробоя. Поэтому за погрешность определения величины напряжения пробоя считают половину шага ступеньки. Так как данный метод предполагается применять для диэлектриков с минимальной толщиной 5 нм (полупроводниковые приборы с проектной нормой 0,18 мкм), то минимальная величина пробивного напряжения будет равна 5 В. Это означает, что вклад последней ступеньки в величину напряжения пробоя составляет около 2 %. С учетом половины последней ступеньки в общей величине напряжения пробоя погрешность измерений равна 1 %, что является вполне приемлемой величиной. Критерием прекращения испытаний является пробой диэлектрика и резкое возрастание тока, величина которого $I_{ymi+1} > 5 \cdot I_{ymi}$, что позволяет достаточно точно определить момент пробоя.

Предложенный метод дает возможность реализовать экспрессный контроль времени наработки на отказ подзатворных диэлектриков полупроводниковых приборов за счет значительного уменьшения времени испытаний и обработки данных. Контроль является эффективным для оперативного выявления потенциально ненадежной продукции.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью разработанного метода проводился анализ влияния быстрой термической обработки (БТО) на надежность подзатворного диэлектрика. Исследования выполнялись на пластинах кремния КЭФ 4,5, КДБ 12 ориентации <100> диаметром 100 мм, на которых путем пирогенного окисления при температуре 850 °C в течение 40 мин формировался подзат-ворный диэлектрик толщиной 42,5 нм. БТО исходных кремниевых пластин и подзатворного диэлектрика проводилась с нерабочей стороны пластины в естественных атмосферных условиях некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая ее нагрев до температуры 1100 °С. На подготовленных таким образом образцах на комплексе прецизионного анализа характеристик элементной базы микросхем (тестовых структур) модели В1500 фирмы Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 АР

фирмы *Cascade* (США), проводились тестовые испытания надежности подзатворного диэлектрика.

Полученные экспериментальные результаты (рисунок 1, 2) и проведенные на их основании расчеты позволили установить, что величина пробивных напряжений подзатворного диэлектрика, полученного пирогенным окислением кремния КЭФ 4,5 (рисунок 1*a*), на уровне тока 1 мА составляет 51,80 В при скорости развертки напряжения в процессе измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) 1,00 В/с и 48,38 В при скорости развертки 0,25 В/с, т.е. $\Delta U = 3,42$ В. На основании данных измерений рассчитанная в соответствии с выражением (5) величина β составляет 0,405, а следовательно, время наработки на отказ такого подзатворного диэлектрика, определенное на основании выражения (4), равно 13,3 года.

В случае проведения предварительной БТО исходных кремниевых пластин КЭФ 4,5 и их последующего пирогенного окисления (рисунок 1*b*) величина пробивных напряжений на уровне тока 1 мА составляет 53,6 В при скорости развертки напряжения 1,00 В/с и 50,08 В при скорости развертки 0,25 В/с, т.е. $\Delta U = 3,52$ В. На основании расчетов, проведенных в соответствии с выражениями (5) и (4), время наработки на отказ для такого диэлектрика составило 16,7 года, т.е. проведение предварительной БТО исходных кремниевых пластин КЭФ 4,5 увеличивает время наработки на отказ подзатворного диэлектрика, полученного пирогенным окислением, в 1,26 раза.

В случае применения БТО как исходных кремниевых пластин КЭФ 4,5, так и подзатворного диэлектрика (рисунок 1*c*) величина пробивного напряжения на уровне тока 1 мА составляет 49,9 В при скорости развертки напряжения 1,00 В/с и 46,73 В при скорости развертки 0,25 В/с, т.е. $\Delta U = 3,17$ В. Расчетное значение времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика в этом случае составляет 25,2 года, т.е. в 1,89 раза больше, чем при стандартном процессе пирогенного окисления, и в 1,5 раза больше, чем при применении БТО только исходных кремниевых пластин.

Аналогичные исследования по времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика были проведены и для пирогенного окисления кремниевых пластин КДБ 12 (рисунок 2).





Рисунок 1 – Результаты испытания наработки на отказ подзатворного диэлектрика, выращенного на подложке КЭФ 4,5: *а* – стандартный процесс окисления; *b* – стандартный процесс окисления с БТО исходной подложки кремния; *с* – стандартный процесс окисления с БТО исходной подложки и подзатворного диэлектрика: 1 – ВАХ при скорости развертки 1 В/с; 2 – ВАХ при скорости развертки 0,25 В/с

Figure 1 – Test results of the error-free running time of the gate dielectric, grown on the KEF 4.5 substrate: a – standard oxidation process; b – standard oxidation process with rapid thermal treatment of the initial silicon substrate; c – standard oxidation process with rapid thermal treat-ment of the initial substrate and gate dielectric; 1 – IV-parameters with the scansion rate of 1 V/sec; IV-parameters with the scansion rate of 0.25 V/sec

Рисунок 2 – Результаты испытания наработки на отказ подзатворного диэлектрика, выращенного на подложке КДБ 12: *а* – стандартный процесс окисления; *b* – стандартный процесс окисления с БТО исходной подложки кремния; *с* – стандартный процесс окисления с БТО исходной подложки и подзатворного диэлектрика: 1 – ВАХ при скорости развертки 1 В/с; 2 – ВАХ при скорости развертки 0,25 В/с

Figure 2 – Test results of the error-free running time of the gate dielectric, grown on the KDB 12 substrate: a – standard oxidation process; b – standard oxidation process with rapid thermal treatment of the initial silicon substrate; c – standard oxidation process with rapid thermal treatment of the initial substrate and gate dielectric; 1 – IV-parameters with the scansion rate of 1 V/sec.; 2 – IV-parameters with the scansion rate of 0.25 V/s В этом случае для стандартного процесса окисления анализ пробивного напряжения двуокиси кремния (рисунок 2*a*) показал, что на уровне 1 мА оно составляет 60,50 В при скорости развертки напряжения 1,00 В/с и 56,39 В при 0,25 В/с, т.е. $\Delta U = 4,11$ В. При такой величине ΔU расчетное значение β , проведенное на основании выражения (5), составляет 0,337, что обеспечивает расчетное время наработки на отказ подзатворного диэлектрика 12,5 года.

Проведение БТО исходных кремниевых пластин КДБ 12 дает возможность получение пирогенного окисла с пробивным напряжением 60,90 В при скорости развертки напряжения 1,00 В/с и 56,80 В при 0,25 В/с, разность которых составляет 4,10 В (рисунок 2*b*), тем самым обеспечивая расчетное время наработки на отказ такого диэлектрика 15,1 года. Как видно такая обработка пластин кремния КДБ 12 увеличивает время наработки на отказ подзатворного диэлектрика в 1,21 раза, как и в случае подложки КЭФ 4,5.

При проведении БТО как исходных кремниевых пластин КДБ 12, так и подзатворного диэлектрика (рисунок 2c) его пробивное напряжение на уровне тока 1 мА составляет 61,5 В при скорости развертки напряжения 1,00 В/с и 57,43 В при 0,25 В/с. Это обеспечивает, как показали расчеты, наработку на отказ диэлектрика 21,7 года, что в 1,74 раза больше, чем без применения быстрой термообработки. При этом данная величина в 1,16 раза меньше, чем в случае подложек КЭФ 4,5.

Из приведенных результатов видно, что проведение БТО подзатворного диэлектрика вносит больший вклад в увеличение его надежности по сравнению с предварительной обработкой исходных кремниевых пластин перед окислением.

Заключение

Предложен оригинальный метод, позволяющий реализовать экспрессный контроль времени наработки на отказ подзатворных диэлектриков полупроводниковых приборов за счет значительного уменьшения времени испытаний и обработки данных. Достоинством предложенного метода является возможность оценки надежности подзатворного диэлектрика микросхем в диапазоне температур эксплуатации от -60 до +125 °C путем непосредственных измерений характеристик тестовых структур при соответствующей температуре эксплуатации.

Практическая реализация данного метода показала, что быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин с последующим их пирогенным окислением приводит к увеличению времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика в среднем с 12,9 до 15,9 года (в 1,23 раза). Термообработка исходных кремниевых пластин и подзатворного диэлектрика позволяет увеличить время наработки на отказ до 25,2 года, которая в 1,89 раза больше, чем при стандартном процессе пирогенного окисления, и в 1,5 раза больше, чем при применении быстрой термообработки только исходных кремниевых пластин.

Список использованных источников

1. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омельяновская // ФТП. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.

2. *Aleksandrov, O.V., Dus', A.I.* A Model of Formation of Fixed Charge in Thermal Silicon Dioxide / O.V. Aleksandrov, A.I. Dus' // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, No. 4. – P. 467–473. **DOI:** 10.1134/S1063782611040026

3. *Харченко, В.А.* Проблемы надежности электронных компонент / В.А. Харченко // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 52–57. **DOI:** 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57

4. Данилин, Н. Проблемы применения перспективной электронной компонентной базы в космосе / Н. Данилин, С. Белослудцев // Современная электроника. – 2006. – № 4. – С. 16–17.

5. *Красников, Г.Я.* Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. / Г.Я. Красников. – М. : Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.

6. *Никифоров, А.Ю*. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец // Спецтехника и связь. – 2011. – № 4. – С. 2–4.

7. EIA/JEDEC Standart 35-A, Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectriec. – JEDEC Solid State Technology Association, Arlington. – 2001. – P. 1–40.

8. EIA/JEDEC Standart 122E, Failure Mechanisms and Models tor Semiconductor Devices. – JEDEC Solid State Technology Association, Arlington. – 2009. – P. 8–12.

9. Solodukha, V.A. Prefailure Life Time Simulation of the Submicron ICs' Gate Dielectric as per the

Breakdown Voltage Value at the Various Sweep Rates / V.A. Solodukha, S.V. Shvedov, A.N. Petlitsky, R.R. Chyhir // Proceedings 9th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Indastrial Implementation», Zakopane, Poland, June 23–26. – 2015. – P. 20.

10. Белоус, А.И. Методы повышения надежности микросхем на основе тестовых структур / А.И. Белоус, А.С. Турцевич, Г.Г. Чигирь. – Германия, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking, 2012. – 240 с.

References

1. Bobrova E.A., Omelyanovskaya N.M. [Peculiarities of Volt – Farad Characteristics of MOS Structures, Determined by Charge in Oxide]. *FTP*, 2008, vol. 42, is. 11, pp. 1380–1383 (in Russian).

2. Aleksandrov O.V., Dus A.I. [A Model of Formation of Fixed Charge in the Thermal Silicon Dioxide]. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, no. 4, pp. 467–473. **DOI:** 10.1134/S1063782611040026

3. Kharchenko V.A. [Reliability Problems of Electronic Components]. *News Bulletin Materials of Electronic Engineering*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 52–57 (in Russian). **DOI:** 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57

4. Danilin N., Belosludtsev S. [Application Problems of the Prospective Electronic Component Base in Space]. *Modern Electronics*, 2006, no. 4, pp. 16–17 (in Russian).

5. Krasnikov G.Ya. Design-Technological Peculiarities of the Sub-Micron MOS-Transistors : in 2 parts. Moscow, Technosphere Publ., 2002, part 1, 416 p. (in Russian).

6. Nikiforov A.Yu., Telets V.A. [Radiation Resistance of the Electronic Component Base of the Special Equipment and Communications, 2011, no. 4, pp. 2–4 (in Russian).

7. EIA/JEDEC Standard 35-A, Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectriec, JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, 2001, pp. 1–40.

8. EIA/JEDEC Standard 122E, Failure Mechanisms and Models tor Semiconductor Devices, JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, 2009, pp. 8–12.

9. Solodukha V.A., Shvedov S.V., Petlitsky A.N., Chyhir R.R. Prefailure Life Time Simulation of the Submicron ICs' Gate Dielectric as per the Breakdown Voltage Value at the Various Sweep Rates. *Proceedings 9th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation»*, Zakopane, Poland, June 23–26, 2015, p. 20.

10. Belous A.I., Turtsevich A.S., Chigir G.G. Methods of Enhancing Reliability of Integrated Circuits on the Basis of Test Structures. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking Publ., 2012, 240 p. (in Russian).

УДК 621.039

Методика обоснования представительности измерений при помощи пространственных кондуктометрических датчиков для исследования гидродинамики однофазных потоков теплоносителя

Баринов А.А.¹, Главный В.Г.², Дмитриев С.М.¹, Легчанов М.А.¹, Рязанов А.В.¹, Хробостов А.Е.¹

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия ²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия

Поступила 29.10.2018 Принята к печати 27.11.2018

Метод исследований гидродинамики при помощи пространственных кондуктометров активно используется в международной практике проведения эталонных верификационных экспериментов. Целью данной работы являлось создание методики обоснования представительности измерений при помощи пространственных кондуктометрических датчиков для измерений в однофазных потоках.

В статье рассмотрены аспекты работы пространственных кондуктометрических датчиков в полях неравномерной проводимости при исследовании гидродинамики однофазных потоков теплоносителя. Приводятся методы эквивалентных замещений выделенной ячейки и всей измерительной области датчика. Предложены методы оценки приемлемости упрощений для пересчета измеряемой проводимости в поле удельной электропроводности среды. Проведена декомпозиция источников неопределенности результатов измерений.

Выполнены эксперименты и численное моделирование сетчатого датчика для выяснения интенсивности межъячеечного влияния и погрешности тарировки. Результаты расчетов показали существенную зависимость показаний датчика от контрастности измеряемого поля и геометрического размера возмущений. Предложенная методика оценки неопределенности апробирована на конкретных датчиках и измерительной системе. Полученные результаты актуальны для постановки валидационных экспериментов с применением трассеров и метода кондуктометрии.

Ключевые слова: измерительная система, пространственная кондуктометрия, неопределенность результатов измерений, валидация, точность измерений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324

Адрес для переписки: Баринов А.А. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия e-mail: LXBARINOV92@MAIL.RU	Address for correspondence: Barinov A.A. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia e-mail: LXBARINOV92@MAIL.RU
Для цитирования: Баринов А.А., Главный В.Г., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Рязанов А.В., Хробостов А.Е. Методика обоснования представительности измерений при помощи пространственных кондуктометрических датчиков для исследования гидродинамики однофазных потоков теплоносителя. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 4. – С. 314–324. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324	 For citation: Barinov A.A., Glavny V.G., Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Ryazanov A.V., Khrobostov A.E. [Method of Measurement Representativeness Assessment for Spatial Conductometric Sensors as Applied to Investigation of Hydrodynamics in Single Phase Flows]. Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 4, pp. 314–324 (in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324

Method of Measurement Representativeness Assessment for Spatial Conductometric Sensors as Applied to Investigation of Hydrodynamics in Single Phase Flows

Barinov A.A.¹, Glavny V.G.², Dmitriev S.M.¹, Legchanov M.A.¹, Ryazanov A.V.¹, Khrobostov A.E.¹

 ¹Nizhny Novgorod State Technical Univercity n.a. R.E. Alekseev, Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
 ²S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, Akademician Lavrentiev Ave., 1, Novosibirsk 630090, Russia

Received 29.10.2018 Accepted for publication 27.11.2018

Abstract

The well-known method of spatial conductometry is widely used for hydrodynamical investigations in the frame of validation benchmarks. The aim of the work was to develop the method of representativeness substantiation for use of the conductometric sensors in single-phase applications.

The paper presents aspects of wire-mesh sensors (WMS) applications in non-uniform conductivity fields. The equivalent electrical circuits for the measurement cell and WMS are proposed and investigated. The methods of translation from measured conductance to conductivity of the water are discussed. Decomposition of the uncertainty sources and their propagation through measurements are investigated.

To obtain the «cross-talk» effect of the measurements the final-element model of WMS flow domain was created. The results of calculations showed the dependence of the measurement results on the conductivity contrast in the cells as well as on the size of the contrast domain. The proposed method of the measurement uncertainty estimate was applied to the real WMS and it's measurement system. The obtained results are topical for validation tests with the use of tracer methods and WMS.

Keywords: measurement system, spatial conductometry, experiment uncertainty, validation, measurement accuracy.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324

Адрес для переписки: Баринов А.А. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия e-mail: LXBARINOV92@MAIL.RU	Address for correspondence: Barinov A.A. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia e-mail: LXBARINOV92@MAIL.RU
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Баринов А.А., Главный В.Г., Дмитриев С.М., Легчанов М.А.,	Barinov A.A., Glavny V.G., Dmitriev S.M., Legchanov M.A.,
Рязанов А.В., Хробостов А.Е.	Ryazanov A.V., Khrobostov A.E.
Методика обоснования представительности измерений при помощи	[Method of Measurement Representativeness Assessment for Spatial
пространственных кондуктометрических датчиков для исследования	Conductometric Sensors as Applied to Investigation of Hydrodynamics
гидродинамики однофазных потоков теплоносителя.	in Single Phase Flows].
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
2018. – Т. 9, № 4. – С. 314–324.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 314–324 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-314-324

Введение

В настоящее время активно развиваются гидродинамические эксперименты в поддержку валидации программ трехмерного моделирования гидродинамики (*CFD*). Такие исследования требуют применения измерительных систем высокой точности, пространственной и временной разрешающей способности. Лидирующие позиции в данной области занимают бесконтактные оптические методы измерения параметров потока (*PIV*, *LIF*, *LDA*, тепловизоры), а также некоторые интрузивные инструменты – термоанемометры, пространственные кондуктометры, термопары и др.

Метод кондуктометрии при помощи сетчатых датчиков (*Wire Mesh Sensor*, *WMS*) был предложен в [1], его применения охватывают измерения в одно- и двухфазных потоках. В последнее время в связи с повышенным вниманием к применению *CFD* в области моделирования многофазных потоков *WMS* используются для измерения локальных долей фаз в поперечном сечении измерительной области. Подробный обзор, посвященный применению *WMS* в двухфазных потоках, приведен в [2].

Необходимо отметить, что, несмотря на значительный объем экспериментов, выполненных с привлечением *WMS*, публикации, посвященные методикам калибровки, оценке неопределенности и детальному исследованию работы датчиков, практически отсутствуют. Исключение составляют работы [3, 4], однако содержащийся в них материал нуждается в дополнении. В то же время требования к экспериментам *CFD*-качества говорят о необходимости тщательного исследования неопределенности измерения, поскольку на нее приходится значительная часть общей «неопределенности валидации» расчетной программы [5].

В настоящее время авторами ведется работа по расчетно-экспериментальному моделированию процессов смешения потоков в напорных камерах водо-водяных ядерных реакторов, которая основана на однофазных экспериментах с использованием потоков с различной концентрацией растворенной примеси [6]. Запланированная матрица экспериментальных режимов направлена на исследование вопросов масштабирования результатов *CFD*-расчетов, что требует сравнения результатов проливов экспериментальной модели в широком диапазоне параметров смешиваемых потоков. Полноценное сравнение и практические выводы, которые могут быть получены в результате такой работы, требуют понимания неопределенности эксперимента, в том числе неопределенности применяемого метода измерений и обработки результатов. Поэтому целью данной работы являлось создание методики обоснования представительности измерений при помощи пространственных кондуктометрических датчиков применительно к экспериментам в однофазных потоках теплоносителя.

Описание импедансометрической измерительной системы

Применяемая в работе измерительная система ЛАД-36ИС [6] позволяет производить опрос пространственных кондуктометров с частотой синхронного сканирования до 10 кГц и длительностью непрерывной записи в течение нескольких минут. В отличие от зарубежных аналогов в системе реализован принцип частотной декомпозиции измерительного сигнала, что дает возможность производить полностью синхронный опрос всего сечения сетчатых датчиков и нескольких датчиков стержневого типа. Схема произвольного измерительного канала системы представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема замещения измерительной цепи с одной кондуктометрической ячейкой: Rn – нагрузка генератора, обусловленная растечками тока на другие приемники и генераторы; Rx – сопротивление кондуктометрической ячейки; Rs – внутреннее сопротивление генератора; Vex – измеряемое напряжение генератора; Vrx – измеряемый сигнал с приемного электрода, VG – управляемый генератор напряжения, OPA – операционный усилитель; Rf – плечо усилительного каскада; Ui – напряжение на струне генератора

Figure 1 – Equivalent circuit of the sensor cell: Rn – generator load caused by current distribution to other drains; Rx – conductometry cell resistance; Rs – internal generator resistance; Vex – measured generator voltage; Vrx – receiver electrode signal, VG – voltage generator, OPA – operational amplifier; Rf – gain coefficient resistor; Ui – generator electrode potential Пересчет измеряемого напряжения в величину проводимости производится по формуле:

$$Gx = \frac{Vrx(1 + Rs(Gx + Gn))}{Vex \cdot Rf}, CM,$$
(1)

где Rs – внутреннее сопротивление генератора; Gn – проводимость контура растечек на другие приемники и поверхности; Vex – измеряемое напряжение генератора; Rf – сопротивление плеча усилительного каскада.

При соблюдении условия:

$$Rs(Gx+Gn) \to 0 \tag{2}$$

и постоянстве известной геометрической константы ячейки kg, см⁻¹ формулу (1) можно использовать для вычисления удельной электрической проводимости (УЭП) среды в ячейке в виде:

$$\lambda x = \frac{Vrx \cdot k_g}{Vex \cdot Rf} 10^6, \text{ MKCM/CM.}$$
(3)

Особенности работы кондуктометрических датчиков в условиях неравномерного поля проводимости

Анализ литературы [1–4] показывает, что в большинстве случаев калибровку сетчатых датчиков производят по следующему алгоритму:

– проводится серия калибровочных замеров при заполнении измерительной области несколькими растворами с известными значениями УЭП (σ , мкСм/см), которые измеряются при помощи эталонного кондуктометра. Показания измерительной системы (выражаемые в измеренной проводимости [G, Ом⁻¹ = См] или напряжении [U, B]) записываются в качестве «опорных» значений;

– серия опорных значений $\{G_i, \sigma_i\}$ или $\{U_i, \sigma_i\}$ используется для построения калибровочного полинома вида $G = f(\sigma)$ или $U = f(\sigma)$ для каждой калибровочной ячейки. Как правило, используется линейная зависимость, построенная по двум калибровочным точкам;

– получаемые в ходе измерений в реальном потоке значения измерительного сигнала, снимаемого с электродов, пересчитываются в локальную мгновенную УЭП потока по полученным калибровочным полиномам.

Заметим, что локальные значения УЭП, получаемые таким методом, основываются на предположении об инвариантности калибровочной характеристики датчика при переходе от условий

калибровки к условиям реального потока, а также на независимости сигналов смежных электродовприемников сигнала. Исследования по освоению пространственных кондуктометров позволили выявить некоторые методические детали использования датчиков:

– анализ литературы по электрохимии [7] говорит об ограниченной точности линейного приближения зависимости УЭП от солесодержания. Особенно заметно это при работе в широком диапазоне проводимости, что реализуется, как правило, в экспериментах с использованием высококонтрастных трассеров. Для соли сульфата натрия (Na₂SO₄) использование УЭП (σ) вместо концентраций (*C*) при стандартной нормировке для трассеровых экспериментов вида:

 $\varphi_c = \frac{C_x - C_0}{C_1 - C_0} (где Cx - измеряемая концентрация в ячейке; C_1 - концентрация трассера; C_0 - концентрация «фона») приводит к погрешности безразмерного комплекса <math>\varphi$, зависящей от контрастности и измеряемой величины (рисунок 2), причем при больших контрастностях ошибка и ее нелинейность существенно возрастают. Это налагает определенные ограничения на контрастность используемого трассера; неучет данного обстоятельства может вызвать методическую погрешность, поскольку уравнение переноса, оцениваемое по измерениям эксперимента, содержит именно массовую долю (концентрацию) примеси, а не косвенную величину указывающей на нее проводимости среды;

– выполненные калибровки на средних соленостях указывают на неточность линейной зависимости измеряемой проводимости от УЭП раствора. Так, для ЛАД-З6ИС и применяемых датчиков данная зависимость лучше всего аппроксимируется квадратичным полиномом;

– при работе в умеренных и высоких скоростях потока (> 0,5 м/с) набегающий поток вызывает вибрацию и выгиб электродов датчика, что может вызвать смещение калибровочной характеристики, а также завышение шумового порога датчика. Компенсация данного явления возможна двумя путями: повышением жесткости электродов (введением дополнительных опорных конструкций для электродов, увеличением толщины электродов и усилия натяжения) или проведением калибровки в потоке с рабочей скоростью (в этом случае калибровочные точки учитывают изменение геометрии ячеек, а также выявляется

собственный шумовой порог, обусловленный в том числе вибрацией электродов);

– в силу неэкранированности ячеек пространственных кондуктометров наблюдается достаточно сильная зависимость сигналов измерительной системы от параметров канала, в который устанавливается датчик. Особенно сильно влияние сосуда на ток генераторов (в металлическом канале он может значительно увеличиваться из-за растечки на большие заземленные стенки). По этой причине калибровочные функции ячеек датчика остаются реалистичными лишь в канале, в котором производилась калибровка.



sigm (УЭП) – в мкСм/см, k_{meas} – контрастность измеренной проводимости (ϵ [1, 2])

sigm (conductivity) – in uS/cm, k_{meas} – contrast of the measured conductance (ϵ [1, 2])

Рисунок 2 – Ошибка при замене относительной концентрации на относительную удельную электрическую проводимость (УЭП) при нормировке (показано семейство кривых, соответствующих различным УЭП «пресной» воды и контрастности «соленой» k = 2)

Figure 2 – Error in normalization caused by substitution of salinity by conductivity (set of curves corresponds to different conductivities of «bulk» water when contrast of the «salty» water k = 2)

В качестве общих замечаний отметим следующее: подтверждение инвариантности калибровочной характеристики датчика при переходе от условий калибровки к условиям реального потока, а также независимости сигналов смежных электродов-приемников сигнала не найдено в литературе. Также определение максимальной УЭП, при которой допускается работа датчиков (соблюдается условие (2)), требует оценки в каждом конкретном случае. Методики таких оценок также не найдены в литературе.

Для достижения поставленной цели в рамках проведенной работы решались следующие задачи:

 – оценка параметров измерительной системы и диапазона соблюдения условия (2); моделирование измерительной области датчика в условиях неравномерного поля проводимости жидкости и получение оценки калибровочных характеристик ячеек в различных условиях;

 подтверждение расчетных значений неопределенности на основе эксперимента на контрастном потоке рабочей среды.

Оценка параметров измерительной системы

Свойства применяемой измерительной системы исследовались при помощи имитации работы сетчатого датчика (3 × 3 ячейки) в неравномерном поле проводимости с использованием схемы-замещения, представленной на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема-замещение сетчатого датчика, заполненного однофазной средой с неравномерной проводимостью (обозначения – см. рисунок 1)

Figure 3 – Equivalent circuit for wire mesh sensor in single-phase flow with nonuniform distribution of conductivity (symbols are like at Figure 1)

Сопротивления ячеек моделировались многооборотными подстроечными резисторами, присоединяемыми к каждому узлу датчика и допускающими точную настройку сопротивления индивидуально по узлам. Исследование проводилось путем серии измерений, в ходе которых сопротивления ячеек сначала выставлялись в одинаковые значения («фоновое сопротивление»), а затем сопротивление центральной ячейки уменьшалось, моделируя наличие раствора повышенной солености в данной ячейке (что характеризуется величиной «контрастности» – отношением повышенной проводимости в ячейке возмущения к «фоновой» проводимости в остальных ячейках). Величины «фонового» сопротивления и возмущения в центральной ячейке выбирались из характерного ряда, для каждого сочетания «фон-возмущение» производилось измерение сигналов ЛАДЗ6-ИС. Сопротивления подбирались из примерного соответствия проводимостям ячеек, полученным при измерениях в реальном потоке теплоносителя. Пример полученных значений для одной серии замеров приведен в таблице 1. *Таблица 1/Table 1*

Данные измерений в неравномерной матрице проводимостей ячеек Индексы: 0 – фоновый, *x* – измеренный, *k* – контрастный

Μ	[easurements	in	nonuniform	cell	conductance matrix
T A 1	leasurements		nonumorm	CCII	conductance matrix

Indices:	0 - bulk,	x - measured	k - contrast
----------	-----------	--------------	--------------

	<i>Gx</i> , См		<i>Gx–Gx</i> 0, См			3			max ɛ
R0 = 450 Om, k = 1 (Rk = R0)									
2,14e-03	2,13e-03	2,17e-03	0	0	0	0	0	0	0
2,13e-03	2,11e-03	2,16e-03	0	0	0	0	0	0	0
2,07e-03	2,08e-03	2,13e-03	0	0	0	0	0	0	0
			R0 = 45	0 Ом, $k = 1$,1 (Rk = 40)	9 Ом)			
2,14e-03	2,13e-03	2,17e-03	-2,79e-07	-8,57e-07	3,97e-08	0,01 %	0,04 %	0,00 %	0,11 %
2,12e-03	2,32e-03	2,15e-03	-2,37e-06	2,16e-04	-1,98e-06	0,11 %	10,17 %	0,09 %	
2,07e-03	2,08e-03	2,13e-03	1,09e-07	-1,41e-06	7,17e-07	0,01 %	0,07 %	0,03 %	
R0 = 450 Ом, k = 1,8 (Rk = 250 Ом)									
2,14e-03	2,12e-03	2,17e-03	-1,85e-06	-1,01e-05	-1,39e-06	0,09 %	0,48 %	0,06 %	0,87 %
2,11e-03	3,78e-03	2,14e-03	-1,85e-05	1,67e-03	-1,77e-05	0,87 %	78,37 %	0,82 %	
2,07e-03	2,07e-03	2,13e-03	-1,04e-06	-1,13e-05	-3,97e-07	0,05 %	0,54 %	0,02 %	
R0 = 450 Ом, k = 2,0 (Rk = 225 Ом)									
2,14e-03	2,12e-03	2,17e-03	-1,31e-06	-1,17e-05	-7,51e-07	0,06 %	0,55 %	0,03 %	1,03 %
2,10e-03	4,21e-03	2,13e-03	-2,18e-05	2,10e-03	-2,12e-05	1,03 %	98,73 %	0,98 %	
2,07e-03	2,07e-03	2,13e-03	-5,26e-07	-1,34e-05	1,65e-07	0,03 %	0,64 %	0,01 %	

Данные измерений говорят о наличии влияния фактической проводимости в ячейках датчика на измеряемую проводимость в соседних ячейках, причем такое влияние усиливается при повышении общего уровня проводимости и «контрастности» примеси. Наибольшая зависимость наблюдается между показаниями соседних ячеек, при удалении от ячейки возмущения интенсивность взаимного влияния быстро спадает. Оценка интенсивности влияния производилась по формуле $\varepsilon = \frac{G_{xk} - G_{x0}}{G_{x0}}$, где G_{x0} – величина проводимости в (*i*,*j*)-й ячейке при «неконтрастном» замере; *G*_{*xk}</sub> – величина проводимости в той же ячейке при</sub>* внесении возмущения (контраста) в центральную ячейку. Полученные оценки представлены в виде семейства функций от абсолютной проводимости и контрастности (рисунок 4).



Рисунок 4 – Зависимость интенсивности взаимного влияния ячеек датчика при различном уровне средней проводимости («фона») и контрастности возмущения

Figure 4 – Reciprocal influence (cross-talk) of the sensor cells with different levels of average conductivity (bulk water) and contrast of the perturbation

Полученные зависимости удобно использовать при планировании эксперимента, для отыскания оптимального сочетания фоновой проводимости и контрастности растворов для соблюдения выбранного порога взаимного влияния ячеек. Величина влияния характеризует в т.ч. «размытие» получаемого поля проводимости и ограничивает локальность измеряемой величины.

Моделирование измерительной области датчика в условиях неравномерного поля проводимости жидкости

Реальные условия измерений в однофазном потоке характеризуются наличием сплошной проводящей среды в измерительной области датчика, проводимость которой в каждой точке области является стохастической нестационарной функцией времени. В таком случае приведенная на рисунке 3 схема-замещение в сосредоточенных параметрах дает лишь приближенное описание датчика. Для определения условий, при которых данная модель является достаточным приближением реального поведения системы «датчик-поток», было проведено моделирование данной системы в ПО COMSOL Multiphysics с использованием физического модуля Electric Currents [8]. В качестве прототипа для модели использовался сетчатый датчик, установленный в верхней камере модели стенда ФТ-40 (5 × 5 ячеек, [6]). Общий вид сетчатого датчика, расчетной области и фрагментов сетки представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Натурный вид датчика (*a*) и его расчетная конечно-элементная модель (*b*). Красным обозначена зона возмущения проводимости

Figure 5 – Real sensor (a) and finite-element model (b). Red circles surround perturbation conductivity zone

Для моделирования зоны контрастной проводимости (возмущения) задавался отдельный объем воды в виде цилиндра с диаметром из ряда D = 8, 20, 30, 40 мм и высотой 12 мм (рисунок 5*b*), расположенный симметрично относительно средней плоскости слоев и охватывающий центральную ячейку сетчатого датчика. Датчик имеет межэлектродное расстояние в одном слое («приемник-приемник» или «генератор-генератор») B = 43 мм и высоту ячеек h = 4 мм. Таким образом, высота возмущения полностью охватывает ячейку, в то время как диметр пятна варьируется в диапазоне $\approx 2h...10h$ ($\approx 0,2$ B...1,0 B). Расчетной области присваивались свойства воды

с заданной УЭП, электрохимические явления, протекающие на электродах, не учитывались в физической модели. В области возмущения УЭП воды задавалась большей по сравнению с остальным объемом. Граничные условия: стенки, ограничивающие объем жидкости, электроды-приемники и электроды-генераторы (кроме центрального) -«заземление» (Grounding), центральный электрод-генератор – «заданный потенциал» (electric potential) +1 В, площадки, окаймляющие ввод электродов в поток, - «электроизоляция» (electric insulation). При данных параметрах токи, втекающие в электроды-приемники, определяются главным образом значением проводимости в ячейках, образованных соответствующими приемниками и генератором с потенциалом +1 В. Значение токов численно равно измеренным проводимостям ячеек, поскольку $G = I/U = I[A]/1[B] = I[OM^{-1} \equiv CM]$. Вычисление проводимостей производилось посредством поверхностного интегрирования плотности тока по электродам приемникам, расчет проводился в стационарной постановке. Результаты выполненных расчетов обобщены и представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Зависимость измеренной проводимости от фоновой удельной электрической проводимости (УЭП) и УЭП возмущения

Figure 6 – Dependence of measured conductance on bulk conductivity and perturbation contrast

Анализ результатов показывает, что, по всей видимости, калибровочные зависимости вида $Gx = f(\sigma_{calib})$ могут использоваться для восстановления поля УЭП в реальном потоке $\sigma_{local} = f(Gx)$ только в том случае, если пятно возмущения имеет диаметр, близкий к межэлектродному расстоянию ($D \approx B$, в этом случае схема-замещение в сосредоточенных параметрах является хорошим приближением реальной постановки

и измеренная проводимость ячейки зависит от УЭП среды в ячейке вне зависимости от равномерности поля проводимости). При возмущении меньшего диаметра погрешность пересчета по калибровочной зависимости, полученной в равномерном поле, может быть значительной. Как показали расчеты, относительная погрешность определения УЭП (при нормировке абсолютной погрешности на значение средней УЭП) зависит при прочих равных лишь от контрастности возмущения, но не от величины средней («фоновой») УЭП. Дополнительно была исследована фактической интенсивность влияния УЭП в ячейке на измеренную проводимость в соседних ячейках (подобно эксперименту со схемой-замещением). Величина относительной погрешности в смежных ячейках пропорциональна поперечному размеру возмущения и зависит от его контрастности - так, при размере возмущения D = 40 мм и контрастности k = 1,5 интенсивность влияния достигает 1,45 %, а для следующих ячеек (через одну от соседней) снижается уже до 0,25 %.

Оценка неопределенности процедуры восстановления неравномерного поля проводимости

При проведении лабораторных измерений применяют кондуктометры с эталонными кондуктометрическими ячейками, представляющими собой, как правило, коаксиальные электроды полузакрытого или закрытого типа. Такое устройство ячейки хорошо экранирует ее от особенностей места измерения, формируя собственную «постоянную сосуда» и способствуя получению измерительной характеристики вида $\sigma = k_{\Gamma}G_{r}$, где k_{Γ} , см⁻¹ – «геометрическая константа» ячейки, точно определенная в лабораторных условиях. Применяемые в данной работе исследовательские пространственные кондуктометры лишены ячеек с конструкцией, способствующей постоянству геометрической константы ячеек. По этой причине вместо формулы (3) в качестве пересчетной зависимости используется упомянутая выше процедура тарировки на наборе опорных значений УЭП. В результате измерений на опорных растворах получают тарировочный набор значений измеренной проводимости вида:

$$G_{x0_i} = \frac{U_{meas_i}}{U_{gen_i} \cdot R_f}, C_M,$$
(4)

где U_{meas_i} – измеренные напряжения на электродах приемников при калибровке, Ugen, – измеренные напряжения на электродах генераторов во время калибровки. При этом также имеют ряд соответствующих им значений УЭП о,, измеренных при помощи лабораторного кондуктометра. По совокупности данных строится регрессионная модель соответствия значений интересующего параметра (в данном случае – УЭП) от измеряемой проводимости (которая, как следует из выражения (4), является косвенной измеряемой величиной, получаемой линейным преобразованием непосредственно измеряемой величины U_{meas}). Согласно отдельно проведенным оценкам, зависимость между G_{χ} и σ_{0i} не является линейной, вопреки выражению (4), но с достаточной степенью точности аппроксимируется квадратичной функцией. Таким образом, в работе использовалась полиномиальная регрессионная модель второго порядка, коэффициенты которой определялись по методу наименьших квадратов. Погрешность результата полиномиальной аппроксимации в общем случае зависит от следующих факторов:

– ограниченной точности оценки опорных значений УЭП;

 – ограниченной точности измерения проводимости ячейки;

– погрешности аппроксимации;

 – числа точек в массиве опорных значений и частота их расположения вблизи «рабочих» УЭП эксперимента.

Также определенные ошибки могут быть вызваны отличием параметров датчика при калибровке и во время эксперимента (загрязнение, вибрация и выгиб электродов в потоке, выделение газа на поверхности электродов и др.), что зависит от конструктивного совершенства датчиков и методической отработки эксперимента. При измерениях во время исследовательского режима получают значение проводимости в ячейке, и, пользуясь тарировочными полиномами, пересчитывают измеренную проводимость ячеек в значения УЭП среды в данных ячейках.

Для оценки погрешности получаемых значений УЭП был принят следующий подход:

1. При построении тарировочных кривых каждую калибровочную точку снабжают полем погрешности (см. рисунок 7). Согласно формуле (4) ширина поля отвечает погрешности косвенного измерения проводимости – δG_x , вычисляемой по формуле [9]:

$$G_{x} = f(U_{meas}, U_{gen}, R_{f});$$

$$\delta G_{x} = \left| \frac{\partial f}{\partial U_{meas}} \right| \delta U_{meas} + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{gen}} \right| \delta U_{gen} + \left| \frac{\partial f}{\partial R_{f}} \right| \delta R_{f}.$$
(5)

Выражение (5) может быть переписано в величинах относительной погрешности:

$$\varepsilon G_{\chi} = \frac{\delta G_{\chi}}{G_{\chi}} = \varepsilon U_{meas} + \varepsilon U_{gen} + \varepsilon R_f.$$
(6)

Относительная погрешность измеренного напряжения εU_{meas} зависит от применяемого АЦП (инструментальная часть) и параметров собственного шума комплекса «датчик-измерительная система» (случайная часть); погрешность напряжения генератора εU_{gen} определяется внутренним сопротивлением генератора, которое при больших нагрузках может вызвать «завал» амплитуды; εR_f определяется дрейфом значения масштабирующего сопротивления приемного каскада на ОУ. Высота поля соответствует погрешности определения УЭП эталонным кондуктометром МАРК-603 – $\delta\lambda$, вычисляемой согласно паспорту прибора:

$$\delta\lambda_{lab} = \begin{cases} \pm (0,003\pm0,015\lambda) & для ячейки ДП-015 \\ \pm (0,05\pm0,015\lambda) & для ячейки ДП-15 \end{cases}$$
, мкСм/см.

2. Строится «номинальная» тарировочная характеристика – полином, коэффициенты которого вычисляют по полученным при тарировке значения УЭП и проводимости (центры поля погрешности).

3. Строятся две вспомогательные тарировочные характеристики – полином «минус», отвечающий точкам с наименьшей Gx и наибольшей λ из полей погрешности (левые верхние углы полей погрешности), и полином «плюс», отвечающий точкам с наибольшей Gx и наименьшей λ (правые нижние углы полей погрешности).

4. Поскольку при измерениях во время эксперимента источники погрешностей можно считать аналогичными (консервативно, без учета взаимной компенсации части ошибок в тарировке и эксперименте), ширина поля погрешности измеренной проводимости соответствует ширине поля при тарировке. Поэтому в качестве консервативной оценки погрешности может быть принята разность ординат точки на линии «плюс», соответствующей левому краю поля погрешности, и точки на линии «минус», соответствующей правому краю поля.



Рисунок 7 – Иллюстрация методики оценки погрешности тарировки

Figure 7 – Illustration of method for calibration uncertainty quantification

В качестве примера оценки трубки точности, учитывающей составляющие в выражении (6), при тарировке измерительной системы приведем результаты применения данной процедуры для одной из ячеек нижнего сетчатого датчика экспериментальной модели (рисунок 8, таблица 2).



Рисунок 8 – Пример тарировочной характеристики ячейки реального сетчатого датчика **Figure 8** – Calibration curve example for the cell of the real wire mesh sensor

Таблица 2/Table 2 Пример численной оценки погрешности тарировки ячейки нижнего сетчатого датчика Calibration uncertainty quantification example

Калибро- вочное зна- чение УЭП, мкСм/см Calibration conductivity value, uS/cm	555,0	630,0	782,0	903,0	1110,0	1231,0
Оценка от- носительной ширины поля погреш- ности, % Relative width of error field estimate, %	4,9	4,7	4,8	4,9	5,1	5,4

Из приведенных зависимостей видно, что максимальная величина инструментальной погрешности применяемого метода при определении проводимости потока находится в пределах 6 %.

Заключение

Разработана методика обоснования представительности измерений при помощи применяемого метода. Даны указания на источники погрешности, которые необходимо учитывать при планировании эксперимента и обработке результатов измерений с привлечением пространственных исследовательских кондуктометров. Предложенная методика оценки состоит в декомпозиции проблемы на различные источники неопределенности измерения и их последовательном учете при обработке данных.

Выявленная зависимость показаний датчика от размеров возмущения, а также порядок взаимного влияния ячеек требует дополнительного исследования, в том числе при установлении критерия достаточности детализации датчика для целей исследования. Так, увеличение числа электродов может снизить паразитное взаимное влияние ячеек за счет экранирования соседних электродов друг другом. Вопрос влияния расстояния между слоями электродов на выявленные особенности его работы требует проведения дополнительных вариантных расчетов. Отдельным вопросом является исследование динамической характеристики датчика, необходимой для построения спектральных, корреляционных и статистических оценок измеряемых реализаций.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 13.8823.2017/8.9.

The investigations performed in the frame of basic government order part N_{0} 13.8823.2017/8.9.

Список использованных источников

1. *Prasser, H.M.* A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows / H.M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau // Flow Meas. Instrum. – 1998. – No. 9. – P. 111–119. **DOI:** 10.1016/S0955-5986(98)00015-6

2. *Velasco Peña, H.F.* Applications of wiremesh sensors in multiphase flows / H.F. Velasco Peña, O.M.H. Rodriguez // Flow Measurement and Instrumentation. – 2015. – Vol. 45. – P. 255–273. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.024

3. *Da Silva, M.J.* Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging : Ph.D. dissertation / M.J. Da Silva. – Technische Universität Dresden, 2008.

4. *Prasser, H.M.* Signal response of wire-mesh sensors to an idealized bubbly flow/H.M. Prasser, R. Häfeli//Nuclear Engineering and Design. – Vol. 336. – 2018. – P. 3–14. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.016

5. *Bestion, D.* Requirements for CFD-grade experiments for nuclear reactor thermal-hydraulics / D. Bestion // Proc. of Experimental validation and application of CFD and CMFD codes in nuclear reactor technology workshop CFD4NRS-7. – Shanghai, 2018.

6. *Bolshukhin, M.A.* Experiment-Calculated Studies on Steady State Mixing of Turbulent Flows in Large Scale

Model of Reactor Pressure Chamber for Validation of CFD-Codes / M.A. Bolshukhin, A.V. Budnikov, A.A. Barinov, D.N. Patrushev // Proceedings of REMOO-2018 Conference and Workshop. – Venice, 2018.

7. *Gray, D.M.* Cation conductivity temperature compensation / D.M. Gray, A.C. Bevilacqua // Proc. of International Water Conference. – Pittsburgh, PA, 1997.

8. Прахт, В.А. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электромеханических установках. Программа COMSOL / В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, Ф.Н. Сарапулов; под. общ. ред. Ф.Н. Сарапулова. – М. : Спутник+, 2011. – 158 с.

References

1. Prasser H.M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1998, vol. 9, pp. 111–119. **DOI:** 10.1016/S0955-5986(98)00015-6

2. Velasco Peña H.F., Rodriguez O.M.H. Applications of wire-mesh sensors in multiphase flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, vol. 45, pp. 255–273. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.024

3. Da Silva M.J. Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging. Ph.D. dissertation, Technische Universität Dresden, 2008, 154 p.

4. Prasser H.M., Häfeli R. Signal response of wire-mesh sensors to an idealized bubbly flow. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, vol. 336, pp. 3–14. **DOI:** 10.1016/j.nucengdes.2017.04.016

5. Bestion D. Requirements for CFD-grade experiments for nuclear reactor thermal-hydraulics. *Proc.* of experimental validation and application of CFD and CMFD codes in nuclear reactor technology workshop CFD4NRS-7, 2018, Shanghai, p. 19.

6. Bolshukhin M.A., Budnikov A.V., Barinov A.A., Patrushev D.N. Experiment-Calculated Studies on Steady State Mixing of Turbulent Flows in Large Scale Model of Reactor Pressure Chamber for Validation of CFD-Codes. *Proceedings of REMOO-2018 Conference and Workshop*, 2018, Venice.

7. Gray D.M., Bevilacqua A.C. Cation conductivity temperature compensation. *Proc. of International Water Conference*, Pittsburgh, PA, November 1997.

8. Prakht V.A., Dmitrievsky V.A., Sarapulov F.N. Modelirovanie teplovykh i elektromagnitnykh protsessov v elektromekhanicheskikh ustanovkakh. Programma COM-SOL [Modeling of heat and electromagnetic processes in electrical units. COMSOL program]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2011, 158 p.

УДК 620.179.16+54.1

Особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние геометрических параметров объекта

Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 24.10.2018 Принята к печати 28.11.2018

Применение поверхностных и подповерхностных волн для контроля изделий с двухслойной структурой позволяет расширить возможности диагностирования физико-механических свойств объектов. Цель работы состояла в установлении условий и выдаче рекомендаций, обеспечивающих измерение скорости и амплитуды упругих мод в защитном покрытии и в основе объекта при одностороннем доступе к его поверхности.

На основе представлений лучевой акустики проанализирован акустический тракт и получены соотношения между геометрическими параметрами объектов, акустической базой прозвучивания, длиной волны упругих мод, количеством осцилляций в импульсе, необходимые для нивелирования акустического шума при акустических измерениях.

Проведено сопоставление данных расчетной модели с опытными данными, предложенными для использования в качестве опорных для определения оптимальных условий измерения скорости упругих мод, амплитуды, спектра сигнала и др. Изучены условия устранения паразитного влияния вращающихся мод на измерения при осевом прозвучивании поверхностной волной цилиндрического объекта.

Проанализирован способ измерений, реализуемый путем прямого и обратного прозвучивания объекта малоапертурными и наклонными преобразователями, и получены выражения для определения скорости подповерхностной волны под защитным покрытием в виде клина. Предложено ультразвуковое устройство для возбуждения-приема поверхностных волн с разной скоростью распространения в объектах (изменяющейся на 20–35 %), использующее для акустического согласования сред металлического звукопровода в виде клина. Изучена возможность нивелирования влияния интерференции в защитном слое на выявляемость дефектов в основе материала объемной волной путем создания опорного эхо-сигнала продольной волны заданной частоты и вводимой нормально к поверхности объекта.

Ключевые слова: поверхностные и подповерхностные волны, скорость ультразвука.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Баев А.Р.	Baev A.R.
Институт прикладной физики Национальной академии наук	Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
Беларуси,	of Belarus,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by	e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.	Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V.,
Особенности распространения подповерхностных и поверхностных	Zhavoronkov K.G.
волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние	[Features of the Surface and Subsurface Waves Application for
геометрических параметров объекта.	Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.
Приборы и методы измерений.	Part 1. Influence of the Geometrical Parameters].
2018. – T. 9, № 4. – C. 325–336.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336	2018, vol. 9, no. 4, pp. 325–336 (in Russian).
	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 1. Influence of the Geometrical Parameters

Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V., Zhavoronkov K.G.

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

Received 24.10.2018 Accepted for publication 28.11.2018

Abstract

Application of surface and subsurface waves for control of objects with a double-layer structure allows to extend possibilities of diagnostics of their physico-mechanical properties. The purpose of work was to determine conditions and offer recommendations providing measuring of ultrasonic velocity and amplitude of the former modes in protective layers and in basis of object at one-sided access to its surface.

The analysis of an acoustic path of a measuring system in relation to ultrasonic evaluation of the objects having the restricted sizes and the protective coating according to velocity data of the surface and subsurface waves propagation is made. On the basis of representations of beam acoustics the dependences connecting a wavelength of the excited surface and subsurface modes, thickness and width of a controlled object, acoustic base of a sounding are defined. There are to provide a condition leveling of the influence of an acoustical noise created by the reflected and accompanying waves on parameters of acoustic signal with the given quantity of oscillations in an impulse.

The principle opportunity is shown and conditions for determination of velocity of subsurface body waves in the base material which is under a protective coating layer are established. For these purposes on the basis of use of the block of ultrasonic probes the optimum scheme of a sounding is offered and the analytical expression for calculation of required velocity considering varying of thickness of a covering is received.

The method of acoustical measuring realized by a direct and reverse sounding of the objects with small aperture and angle probes was analysed and formulas for determination of speed of subsurface wave under protective layer of the wedge form have been got. An ultrasonic device is suggested for the excitation-reception of subsurface waves with different speed in objects (on 20–35 %) using for the acoustic concordance of environments of metallic sound duct as a wedge. Possibility of leveling of interference in a protective layer to control efects in basis of material by a volume wave by creation of supporting echo-signal of longitudinal wave of the set frequency and entered normally to the surface of object was studied.

Keywords: surface and subsurface waves, ultrasonic velocity.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Баев А.Р.	Baev A.R.
Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь e-mail: baev@iaph.bas-net.by	Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Левкович Н.В., Жаворонков К.Г.	Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V., Levkovich N.V.,
Особенности распространения подповерхностных и поверхностных	Zhavoronkov K.G.
волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 1. Влияние	[Features of the Surface and Subsurface Waves Application for
геометрических параметров объекта.	Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.
Приборы и методы измерений.	Part 1. Influence of the Geometrical Parameters].
2018. – T. 9, № 4. – C. 325–336.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336	2018, vol. 9, no. 4, pp. 325–336 (in Russian).
	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-325-336

Введение

Применение поверхностных акустических волн (ПАВ) и подповерхностных объемных волн (ПВ) перспективно как для обнаружения несплошностей в поверхностной и подповерхностной зоне различного рода объектов, так и для определения их физико-механических параметров, включая твердость В, механическое напряжение σ, прочность на разрыв σ_{пп}, бальность зерна l_b , глубину упрочненного слоя h, поврежденность металла, наличие отбела в чугуне и др. [1-4]. При этом достаточно часто в качестве наиболее информативного параметра, коррелирующего с указанными свойствами, используется преимущественно скорость той или иной моды либо опосредованные и зависящие от нее параметры или зависимости. Они включают: критические углы падения волны на границу раздела сред; частотные зависимости скорости или амплитуды волны и др. Т.е. $F_i = \{B, \sigma, \sigma_{np}, l_b, h\} = F_i(C_{L,T,S})$, где индексы L и T соответствуют первому и второму критическим углам падения продольной волны на объект, определяющим возбуждение в объекте продольных (головных) и поперечных ПВ соответственно, а *S* – ПАВ. Для эффективного же возбуждения ПАВ и ПВ выбирается угол падения акустического пучка на объект $\beta_{L,T,S}$, определяемый из формулы Снеллиуса: $\sin(\beta_{L,T,S}) = C_0/C_{L,T,S}$. Причем первые две моды относятся к классу неоднородных волн. Акустические поля их источников имеют сложную структуру, характеризуемую наличием поверхностной быстро затухающей с расстоянием волны по закону $A \sim x^{-n}$, где $n \approx 1,7-1,8$ для продольной и $n \approx 2,1-2,2-$ поперечной моды. Так что большая часть энергии акустического поля излучаемых волн дифрагирует и сконцентрирована в объеме объекта, убывая с расстоянием в дальней зоне с показателем степени n = 1 [1, 4]. При этом поток дифрагирующей волны может оказать существенное влияние на измерительный процесс в результате попадания на приемный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) с некоторой временной задержкой Δt в результате рассеяния на граничных поверхностях.

Пример распространения подповерхностных волн в пластине или верхнем (защитном) слое объекта приведен на рисунке 1, где показаны направления распространения акустических лучей рассеянного границей акустического поля. Необходимо учесть, что область локализации энергии дифрагирующих ПВ расширяется с увеличением расстояния от источника колебаний. При этом смещается вниз и максимум плотности энергии ПВ, локализованный в окрестности луча, идущего от источника волн под углом α_m , и расположенный на расстоянии от поверхности $z \approx x \operatorname{ctga}_m$ [4].

В отличие от неоднородных мод, поток энергии ПАВ локализован в окрестности контактной поверхности преимущественно на глубину $h \approx \lambda_s$ и является слабо расходящимся в горизонтальной плоскости, что существенно расширяет номенклатуру контролируемых на структуру и дефектность материалов в поверхностных и подповерхностных слоях. Тем не менее даже в этом случае возможно появление сопутствующих объемных мод, которые могут оказать значимое влияние на достоверность измерений. В то же время такие объекты имеют ограниченные размеры, а поле импульсного источника волн $\Phi(\alpha, \gamma, r)$ объеме может существенно отличаться в от поля в бесконечном пространстве, где ү – угол, отсчитываемый в горизонтальной плоскости z = 0, а $\alpha - в$ вертикальной. При этом одним из важнейших факторов, ограничивающих точность измерений, является создаваемый в материале объекта акустический шум. Последний, как упоминалось выше, вызван рассеянием границей оппозитной сред дифрагирующих волн, попадающих во «временное окно» измерительного электронного тракта $t_2 \ge t^* \ge t_1$, где (рисунок 1) t_1 – время начала отсчета появления информативного импульса, а t₂ - время его завершения. Причем $\Delta t = t_2 - t_1 = m_0 v^{-1} = m_0 T_0$, где *m*₀ – количество колебаний в импульсе, а v-их рабочая частота. Искажение информативного импульса может быть вызвано и генерируемыми при излучении преобразователем сопутствующими модами.

Если же исследуемый материал расположен непосредственно под защитным покрытием, то задача измерений скорости ультразвуковых колебаний (УЗК), а также выявления дефектов существенно усложняется. В особенности это относится к ситуации, когда поверхностный слой обладает неравномерной толщиной либо в нем проявляется резонанс. Указанные выше акустические процессы и являются предметом настоящих исследований. Целью работы являлось установление условий и выдача рекомендаций, обеспечивающих надежное возбуждение и измерение скорости и амплитуды поверхностных и подповерхностных волн как в защитных покрытиях, так и в основе объекта при одностороннем доступе к его контактной поверхности.

Распространение подповерхностных волн в однородном материале с ограниченными размерами

В данном разделе рассмотрены особенности распространения упругих мод при проведении акустических измерений в объекте, имеющем форму пластины либо цилиндра.

Как правило, при использовании импульсных методов измерения скорости или амплитуды волны выбирают характерную зону импульсного сигнала, на которую отсутствует воздействие паразитных сигналов акустической и/или электрической природы, например пролаза. На рисунках 1 и 2 поясняются особенности распространения подповерхностных и поверхностных волн в телах с ограниченными размерами, где их донная поверхность является отражателем УЗК, а рассеянные либо сопутствующие моды, распространяющиеся вдоль свободной поверхности, накладываются на информативный импульс с номером осцилляции *m*, что не позволяет обеспечить необходимую точность измерений.

На основе представлений лучевой акустики проанализируем акустический тракт измерительной схемы (рисунок 1). Обозначим скорость информативной моды как $C_1 = L/(t - \Delta t_{\partial})$, где Δt_{∂} – поправка (включая дифракционную), обусловленная особенностями измерений. Учтем, что при проведении измерений и обработке информативного сигнала необходимо устранить появление на приемном ПЭП во временном окне $t_1 \le t^* \le t_1 + mv^{-1}$ сигнала как отраженных, так и распространяющихся вдоль контактной поверхности сопутствующих мод. При этом в общем виде уравнение акустического тракта для представленной на рисунке 1 схемы прозвучивания материала однократно отраженным лучом имеет вид:

$$A \sim \tilde{D}_E \tilde{D}_R F(S_1) R_f F(S_2),$$

где \tilde{D}_R и \tilde{D}_E – коэффициенты прохождения УЗК по амплитуде границы ПЭП–образец и образец– ПЭП соответственно; $F(S_1)$ и $F(S_2)$ – функции ослабления акустического луча при прохождении волны от излучателя до отражающей поверхности и от нее до приемного ПЭП по пути S_1 и S_2 соответственно; R_f – коэффициент отражения от донной поверхности.



Devices and Methods of Measurements

Рисунок 1 – Пояснение к распространению упругих волн в материале с подложкой (*a*) и анализу картины наложения на информативный импульсный сигнал импульса отраженной или сопутствующей моды, создающей шум при измерениях (*b*). *a*: 1 – излучающий и 2 приемный пьезоэлектрические преобразователи; 3, 4 – контактирующие материалы, 5 – их граница; *b*: 1 – информативный импульсный сигнал; 2 – сигнал, создающий в акустическом тракте шум

h

Figure 1 – Illustration to propagation of elastic waves in layered material (*a*) and for analysis of the reflected or accompanying acoustical impulse creating noise when measuring (*b*). *a*: 1 is sounding probe; 2 is receiving probe; 3, 4 is contacting materials and 5 is their boundary; *b*: 1 is informing impulsive signal; 2 is signal creating noise when acoustical measuring

Необходимо отметить, что сопутствующими для возбуждаемой в объекте преобразователем информативной продольной волны L служат T и S моды, для T моды – L и S, для S - L и Т моды. Причем отношения скоростей упругих мод в стали (к величинам которых близки многие материалы) равны: $n_{SL} = C_S / C_L \approx 0,55$, а $n_{sT} = C_s / C_T \approx 0.9$. Т.е. объемные моды имеют скорость выше, чем у ПАВ, что в ряде случаев может существенно осложнить процесс измерений и требует тщательной методической проработки акустического тракта, при котором нивелируется шум, создаваемый паразитными модами. Если в качестве информативной является *L*-мода или Т-мода, то минимальная акустическая база, при которой отсутствует наложение сопутствующей С_s или С_т моды на *m*-ю осцилляцию измерительного импульса продольной волны, примет вид: $Lv (mC_L)^{-1} \leq C_{TS}(C_L - C_{TS})^{-1}.$

Для устранения влияния наложения на осцилляции информативного сигнала с номером *m* и менее акустических паразитных колебаний, вызванных однократным отражением от донной поверхности части потока информативной или сопутствующей моды, необходимо выполнение условий:

$$\frac{m}{\nu} \ge \frac{L}{C_1} \left[\left(\sqrt{x^{*2} + h^{*2}} + \sqrt{\left(1 - x^{*2}\right)^2 + h^{*2}} \right) n_{0l} - 1 \right], \quad (1)$$

где знак * характеризует обезразмеривание геометрического параметра по L, $n_{0l} = \frac{C_0}{C_1}$, $C_1 \subset \{C_T, C_L, C_R\}$. Как легко показать из анализа формулы (1), быстрее всего на приемный ПЭП приходят волны, рассеянные локальным участком донной поверхности в окрестности x = L/2. Если для проведения корректных измерений акустических параметров среды достаточно использовать «выделенную» во времени $t_1 + mv^{-1}$ часть импульса, то оценочное значение искомой акустической базы, определяемое из (1), примет вид:

$$L_{\lambda} = L/\lambda \le \Im \pm (\Im^2 + \Re)^{0,5}, \tag{2}$$

где $h_{\lambda} = h/\lambda;$ $\Im = m(1 - n_{0l}^{2}) h_{\lambda}^{2};$ $\Re = (m^2 - 4n_{0l}h_{\lambda}^{2})(1 - n_{0l}^{2})^{-1} h_{\lambda}^{2}.$

Если же длительность зондирующего импульса достаточно большая или скорость сопутствующей моды больше информативной, то условие, при котором сопутствующая мода, отражаясь k раз в волноводе, не попадает во временное окно (запаздывает), также определяется выражением (2), где скорректированное значение $\Re = (m^2 - 4k^2n_{0l}^2h_{\lambda}^2)(1 - n_{0l}^2)h_{\lambda}^2$. Это выражение упрощается, когда донной поверхностью объекта рассеивается часть потока акустической энергии основной моды. При этом реализуется указанное условие (4) в виде: $2L_{\lambda} \leq 4(h_{\lambda})^2 m^{-1} - m$.

На рисунке 2 приведены рассчитанные граничные кривые, связывающие акустическую базу, толщину объекта, длину волны и номер осцилляции *m*, при которых сопутствующая паразитная мода не накладывается на осцилляции импульса с номерами осцилляций *m* и менее). Как видно, при проведении измерений с использованием продольной ПВ и уменьшении толщины пластинчатого волновода для соблюдения условий (4) следует либо уменьшать (до определенных пределов) длину акустической базы, либо увеличивать частоту волны. Отметим, что полученные выше зависимости характерны для акустических измерений с использованием как продольных, так и поперечных ПВ.

Как указывалось выше, в волноводах ограниченной толщины при падении акустического луча под вторым критическим углом одновременно генерируется продольная мода, имеющая скорость практически в 2 раза больше, чем поперечная волна. Из указанных выше соображений следует, что при проведении измерений следует избегать таких ситуаций, когда выполняется условие $0 \le \Delta t \le m/\nu$. Пригодными же для измерений являются временные интервалы $0 > \Delta t > m/v$. Как следует из (2), условие $\Delta t = m/v$, при котором происходит наложение k-кратно отраженной (паразитной) продольной ПВ на *т*-й период осцилляции (колебаний) информативного импульса поперечной волны, выполняется, если критическая толщина волновода:

$$h_{\lambda} \rightarrow rac{2}{k+1} \left[\sum_{k=0}^{k=2} a_i \left(L_{\lambda}\right)^k\right]^{0.5},$$

где k – число отражений выделенного акустического луча в волноводе: $a_0 = 1$, $a_1 = 1/2n_{0l}$, $a_2 = 3/4n_{0l}^2$.



Рисунок 2 – Расчетные зависимости граничной толщины верхнего слоя (1–4) и угла преломления на границе контакта призмы пьезоэлектрического преобразователя с объектом (5, 6) от длины акустической базы: номер осцилляции в импульсе информативного сигнала m = 1 (1, 5); 2 (2); 3 (3); 4 (4, 6)

Figure 2 – Calculation dependences of boundary thickness (1–4) and an angle of refraction of ultrasonic beam at the contact boundary prism of ultrasonic probeobject (5, 6) vs. length of acoustic base: a number of the impulse oscillations in informational signal is: m = 1 (1, 5); 2 (2); 3 (3); 4 (4, 6)

Для проверки численных расчетов проведены экспериментальные исследования согласно традиционной методике, поясняемой рисунком 3 и заключающейся в анализе нормализованной амплитуды и формы сигнала при работе ПЭП в теневом режиме. При этом изменение акустической базы L производится путем перемещения одного из ПЭП вдоль оси x образцов разной толщины. Нестабильность выхода генератора электрических импульсов в процессе измерений контролируется путем сравнения с опорным сигналом генератора стандартных сигналов в пределах не более 3-5 %. При этом одновременно производилось фазовым методом измерение скорости продольной волны в материале, из которого изготовлен образец, с погрешностью не хуже 0,05 %.



Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости амплитуды продольной подповерхностной волны от длины акустической базы, измеренные на образцах стальных пластин на частоте 1 МГц (*a*) и 5 МГц (*b*): $h_{\lambda} = \infty$ (1, 4); 1,6 (2); 1 (3); 8,5 (5); 4,7 (6)

Figure 3 – Experimental dependences of amplitude of longitudinal subsurface wave on length of acoustic base measured on the specimens of the steel plates when ultrasonic frequency is of 1 MHz (*a*) and 5 MHz (*b*): $h_{\lambda} = \infty$ (1, 4); 1,6 (2); 1 (3); 8,5 (5); 4,7 (6)

Данные исследований поясняются на рисунке 4, где приведены экспериментальные

зависимости нормализованной амплитуды зондирующей волны ПВ от безразмерной акустической базы L_{2} , измеренные на образцах стальных пластин разной толщины. Как видно, зависимости $A(L_{\lambda})$ монотонно убывающие, совпадающие с аналогичной зависимостью, полученной для случая моделирования образца с безразмерной толщиной $h_{\lambda} >> 1$. При превышении величины $L_{\lambda} \rightarrow L_{\lambda}^{*}$ происходит «расщепление» этих кривых, что сопровождается не только изменением формы импульса, но и отклонением измеряемой скорости от реальной более чем на \approx 0,1–0,2 %. Именно при $L_{\lambda} < L_{\lambda}^{*}$ (а также при допустимых значениях h_{λ}) следует ожидать реализации такого режима теневого прозвучивания, при котором можно пренебречь влиянием переотраженных сигналов на информативный импульс, используемый для определения скорости или амплитуды волны. С другой стороны, с увеличением толщины пластины возрастает величина допустимой акустической базы L,*, что в большинстве случаев позволяет обеспечить большую точность измерения скорости волны.

В результате сравнения результатов экспериментальных исследований и численных расчетов установлено качественное соответствие хода их зависимостей $L_{1}^{*}(h_{1})$. Отметим, что при экспериментальном моделировании распространения продольной ПВ в пластинчатых образцах стали Ст40 толщиной 5 мм на частоте 1,8 МГц измеренная импульсно-фазовым методом фазовая скорость (с использованием для индикации времени распространения сигнала на заданной акустической базе осцилляций с номером m = 1 и 2) практически не отличалась в пределах ± 0.07 % от полученной на образце толщиной 50 мм, моделирующем полубесконечное тело. При этом толщина пластины достигала величины $h_{\lambda} < 2$. Отметим, что оцененные опытные значения граничных величин L_{λ}^{*} , характеризующих наложение паразитного сигнала на информативный сигнал, несколько превышают расчетные данные, полученные с использованием представлений лучевой акустики. При этом, согласно опытным данным, безразмерной толщине образца $h_{2} = 4,7$ соответствует акустическая база прозвучивания металла $L_{\lambda}^* \approx 50$. Данные же расчетов величины L_{λ}^{*} меньше – всего на 14 %. В то же время при $\hat{h}_{\lambda} < 2$ это отличие для L_{λ}^{*} может составить ≈ 50 %. По-видимому, столь существенное различие расчетных и опытных данных наблюдается именно из-за «перекачки» вводимой энергии в пластинчатые моды, имеющие меньшую скорость, чем продольная ПВ. При этом наблюдается значимое ослабление амплитуды информативной моды.

Особенности измерения акустических параметров поверхностных волн на плоской и цилиндрической поверхностях

Поверхностных волн на плоской поверхности

Если информативной является поверхностная мода, то, как указывалось выше и следует из опытных данных, при выборе оптимальной схемы прозвучивания необходимо избавиться от шума паразитного сигнала, создаваемого преимущественно сопутствующей поперечной модой, распространяющейся вдоль поверхности. Влиянием же отраженных от донной поверхности дифрагирующих поперечных волн, как правило, можно пренебречь.



Рисунок 4 – Влияние угла призмы пьезоэлектрического преобразователя на амплитуду возбуждаемой поверхностной и поперечной (сопутствующей) подповерхностной волны и схема проведения исследований поля излучения акустических волн магнитоакустическим методом (ЭМА): $1 - A_s/A_{s0}$; $2 - A_s/A_T$; SAW – поверхностные акустические волны

Figure 4 – Influence of the angle of an ultrasonic probe's prism on amplitude of excited surface A_s and subsurface transverse (accompanying) A_T waves and experimental scheme of the study of the field of radiated acoustical waves by a magnetoacoustic method (EMA): 1 is A_s/A_{so} ; 2 is A_s/A_T ; SAW is surface acoustical waves

Как указывалось выше, отраженные от донной поверхности сопутствующие объемные волны, имеющие скорость, превышающую C_s , а также распространяющаяся вдоль поверхности поперечная ПВ являются паразитными. Для уменьшения их влияния на информативный сигнал предложено не только изменять (по возможности) акустическую базу прозвучивания, частоту волны, но и, что весьма существенно, увеличить угол призмы преобразователя ПАВ. Как видно из полученных и поясняемых на рисунке 5 экспериментальных зависимостей, превышение угла падения волны β_s над оптимальным значением всего на 6° сопровождается снижением амплитуды ПАВ на 9–10 дБ. Однако при этом соотношение сигнал–шум (по отношению к поперечной сопутствующей моде) превышает 20 дБ. Что же касается продольной сопутствующей моды, то ее влиянием, как правило, можно пренебречь.

Поверхностная волна на цилиндрической поверхности

Исследование акустических параметров тел цилиндрической формы поверхностной волной может производиться путем прозвучивания вдоль их образующей. Причем в этом случае, как правило, легче избавиться от шума, создаваемого сопутствующими и отраженными объемными модами, имеющими место в рассмотренной выше ситуации. Следует отметить, что при исследовании объектов низкочастотными модами либо объектов с достаточно малым радиусом кривизны необходимо учитывать влияние на информативный сигнал двух, (зеркально) обегающих в разные стороны цилиндрическую поверхность по винтовой траектории поверхностных мод. Условие наложения на осцилляцию информативного импульсного сигнала (распространяющегося вдоль образующей цилиндра) с номером т обегающих мод имеет вид:

$$L_0 = \frac{b}{2a} (1 - \sqrt{1 - \frac{4ac}{b^2}}), \tag{3}$$

где $a = 2\delta C_{s0}^{-2}$; $b = 2mv^{-1}C_{s0}^{-1}$; $c = 4\pi^2 m^2 v^{-2} \cdot (R/C_{s0})^{-2}(1-2\delta)$; $\delta = \Delta C_s C_{s0}^{-1}$; $\Delta C_s = C_s(\phi) - C_{s0}$; $C_{s0} = C_s$ при $\phi = 0$; $\phi = \pm \arccos(\mathbf{k}_0 \mathbf{k}_0) = \pm \arg(2\pi R/L) - y$ гол наклона волновых векторов \mathbf{k}_0 выделенных акустических лучей поверхностных мод, движущихся по винтовой траектории относительно направления оси волновода и приходящих во «временное окно». Причем $\delta = \delta(\phi)$ является анизотропной функцией согласно [5].

Если пренебречь анизотропией скорости ПАВ, составляющей несколько процентов, то из (3) следует, что $L_0 = \frac{n}{b}$. Как показывают экспериментальные исследования, наложение вращающей моды на зондирующий импульс при плавном осевом перемещении одного из ПЭП сопровождается характерной интерференционной картиной, обусловленной суперпозицией информативной и вращающихся мод. Т.е. результирующий сигнал в области их встречи примет вид:

$$\tilde{A} = A_0 \exp(-ik_0 x) + A_1 \exp(-ik_1 l_1) + A_2 \exp(-ik_2 l_2),$$

где A_0 и k_0 соответствует амплитуде и волновому числу информативной волны, распространяющейся вдоль оси *x* цилиндра, а $\{A_1, k_1\}$ и $\{A_2, k_2\}$ – вращающимся модам; l_1 и l_2 – расстояния, пройденные вращающимися модами до встречи, причем отношения волновых чисел, амплитуд и расстояний, пройденных вращающимися модами – $k_1/k_2 = l_1/l_2 = A_1/A_2 = 1$.

Путем изменения акустической базы, частоты волны, длительности импульса, представляется возможным отстроиться (во времени) от наложения вращающихся мод на информативный сигнал ПАВ, распространяющейся вдоль образующей цилиндрического объекта. С другой стороны, направленно варьируя указанные параметры и измеряя в теневом режиме характерный период между экстремумами T_m суммарного взаимодействия информативной и вращающихся мод, представляется возможным изучать свойства поверхностных слоев твердых тел и их анизотропные характеристики.

Возбуждение и распространение подповерхностных и поверхностных волн в объекте с покрытием

Подповерхностные волны под защитным клиновидным слоем

Задача контроля физико-механических свойств по данным скорости звука существенно осложняется, когда требуется определить скорость C_{L2} в основе материала объекта с высокой точностью, если на нем имеется защитное покрытие с однородными свойствами, но изменяющейся по линейному закону толщиной. Предполагается, что толщина покрытия лежит в пределах $h = h_1 - h_2$, причем $C_{2L}(C)_{1L}^{-1} > 1$.

Для решения этой задачи предлагается схема прозвучивания, поясняемая рисунком 5.

Излучение ПВ производится наклонными ПЭП, а в качестве приемных ПЭП используются малоапертурные преобразователи, обеспечивающие высокую локальность (до 0,3 мм) и стабильность акустического контакта, необходимые для высокоточных измерений скорости упругих волн. Согласно предложенной методике озвучивание объекта производится головными волнами дважды – в противоположных направлениях.

Пусть при проведении измерений ПЭП 1 и ПЭП 2 попеременно излучают ПВ в контролируемый объект 6, а преобразователи 3 и 4 попеременно принимают акустические сигналы. Для этих случаев определяем время распространения сигнала между ПЭП: $\Delta \tau_{21}$ – слева направо, Δτ₁₂- справа налево. Необходимо отметить, что при распространении продольной ПВ вдоль поверхности раздела сред и непосредственно в материал покрытия переизлучаются «вытекающие» продольные и поперечные моды соответственно под первым и вторым критическим углом, что необходимо учитывать при оптимизации режима прозвучивания. Базовое уравнение, связывающее скорость ПВ, акустическую базу прозвучивания (между приемными малоапертурными преобразователями), имеет вид:

$$2(\tau_2 - \tau_1)^2 [L^2 + C_{2L}^2(\tau_1 + \tau_2)^2]^{-1} + C_{2L}^2(\tau_1 - \tau_2)^{-1} = 0$$

+
$$(C_{2L}\sin\beta)^{-1} - (C_{1L}\cos\beta)^{-1} = 0.$$



Рисунок 5 – Схема определения скорости подповерхностной продольной волны под защитным покрытием: 1, 2 – излучающие, 3, 4 – приемные (ненаправленные или малоапертурные) пьезоэлектрические преобразователи; 5 – защитный слой; 6 – основа объекта; C_{1L} и C_{2L} – скорости продольных волн в покрытии и основе объекта

Figure 5 – Scheme of the subsurface longitudinal wave velocity C_{2L} study under protective layer: 1, 2 are sounding probes; 3, 4 are receiving (non-directional) probes; 5 is a protective layer; 6 is the object to test; C_{1L} is ultrasonic velocity in protective layer and C_{2L} is in the material base of the object

Разлагая в ряд Тэйлора искомое решение для C_{2L} , с достаточной для практики точностью (до 8-го порядка малости) получим:

$$C_{2L} = C_{20} \{1 - 2^{-1} n_0 (\Delta \tau_0)^2 + 2^{-4} n_0^2 (\Delta \tau_0)^4 - 2^{-2} n_0^4 (\Delta \tau_0)^8 \},$$

rge $C_{20} = 2L(\tau_1 + \tau_2)^{-1}; \Delta \tau_0 = (\tau_1 - \tau_2)(\tau_1 + \tau)^{-1}; n_0 = C_{1L}/C_{20}.$

Если же скорость в контактирующих материалах известна, то разнотолщинность клиновидного слоя можно оценить по формуле: $\Delta h = [L^2 - C_{2L}^{\ 2}(\tau_1 + \tau_2)^2]^{0.5}$. Таким образом, проведенный выше анализ предложенных схем измерения и полученные оценочные формулы указывают на возможность измерения скорости продольной ПВ в материале, покрытом защитным слоем, обеспечив высокую точность. Т.е. в ряде случаев указанным методом представляется возможным производить оценку структуры основы объекта, напряженное состояние в нем и др.

Проявление интерференционного эффекта в защитном плоском слое

Обратим внимание на тот факт, что при $h_1 \sim \lambda$ следует ожидать эффекта интерференции переотраженных в слое упругих мод, падающих на исследуемую границу под критическими углами, что иллюстрируется рисунком 6. Для проверки этого применительно к контролю объектов с покрытием были проведены экспериментальные исследования согласно опытной схеме, представленной на рисунке 7. Для этих целей были изготовлены стальные образцы размерами $40 \times 120 \times 20$ м⁻³ с нанесенным на них эмалевым покрытием различной толщины (h = 0 - 2 мм) и шагом $\approx 0,1 \text{ мм}$. В качестве отражателя использован прямой двугранный угол стального образца (основы). Были исследованы зависимости амплитуды эхо-сигнала А от толщины эмалевого покрытия h в частотном диапазоне v = 1,8–5 МГц и угла ввода в металл: $\alpha = 0^{\circ}$; 40° ; 50° ; 65° . Некоторые результаты исследования приведены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Влияние толщины покрытия на амплитуду отраженной в объеме материала от дефекта объемной волны: угол ввода $\alpha = 75^{\circ}$ (3); 50° (2); 0° (1): 1, 2 – поперечная, 3 – продольная моды

Figure 6 – Dependence of the protective layer thickness vs. amplitude of reflected signal from defect: angle of input $\alpha = 75^{\circ}$ (3); 50° (2); 0° (1): 1, 2 is transverse and 3 is longitudinal mode



Figure 7 – Предложенная схема преобразователя с дополнительным акустическим каналом для устранения эффекта интерференции в защитном слое на проведение измерений: 1–3 – пьезопластины; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – защитное покрытие; 6 – основной металл; 7 – отражатель-дефект

Figure 7 – Suggested scheme of ultrasonic probe with an additional acoustic channel for the removal of the interference effect in protective layer: 1–3 are piezoelectric plates; 4 is ultrasonic probe; 5 is protective layer; 6 is metallic base; 7 is artificial defect

Прежде всего, следует отметить, что результаты выполненного выше анализа акустического тракта ультразвукового дефектоскопа находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Так, на всех частотах и углах ввода в металл, включая угол $\alpha = \pi/2$ (соответствующий вводу головных волн), проявляется эффект интерференции. В этих условиях функция A(h) имеет осциллирующий вид, размах колебаний амплитуды которой может достигать ~ 10 дБ, что зависит от частоты волны и угла ввода α. С увеличением h ход зависимости функции A(h) «сглаживается» из-за ухудшения условий проявления интерференции в результате ослабления сигнала в покрытии, его ограниченности по времени и выходом переотражаемых в покрытии сигналов из эффективной для резонанса угловой зоны ввода-приема колебаний. По указанной причине при $h_{1} > (2-3)$ эффекты интерференции практически не проявляются, если количество осцилляций в импульсе не более 5-6, что характерно для ультразвукового контроля серийными дефектоскопами.

Таким образом, при определенных условиях для повышения достоверности измерений при движении ПЭП необходимо учитывать возможное изменение h, влияющее на амплитуду измеряемого сигнала. Для этого предлагается метод, заключающийся в создании дополнительного акустического канала и получении опорного сигнала, реагирующего одновременно на проявление резонанса в измерительном тракте на рабочей частоте v. При этом дополнительно используется отраженный от донной поверхности нормально падающий на нее импульс продольной волны. Если скорость продольной моды в защитном слое C_L , а поперечной C_T , то частоту опорного сигнала v* выбирают из условия одинакового фазового сдвига при прохождении защитного слоя сигналом опорной волны и информативным сигналом поперечной или продольной моды ($C_{L,T}$):

$v^*/v = C_L (C_{LT})^{-1} (\cos \alpha)^{-1}.$

Отметим, что наличие дополнительного измерительного канала позволяет повысить надежность измерительного тракта и за счет слежения за качеством акустического контакта. Если же проводятся измерения скорости УЗК, то, возможно, придется учитывать и различие фазовых сдвигов в обоих каналах, вызванных разными условиями переотражения мод в защитном слое.

О возбуждении поверхностных волн в материалах с разной скоростью с использованием клиновидного звукопровода

Необходимо отметить, что проведение высокоточных измерений поверхностными волнами свойств твердых тел с разной (и неизвестной) скоростью C_s существенно затруднено ввиду значимого влияния условий ввода-приема на амплитудные и спектральные характеристики измерительного импульса. При этом получаемая информация о структуре материала и его дефектности недостаточно надежна. Использование же для этой цели набора преобразователей с различным углом призмы ПЭП (либо изменяющимся углом) весьма затруднительно. (Так, например, при структуроскопии чугунов с помощью импульсно-фазового метода их скорость может изменяться до 30–40 %.)

Предложенная и апробированная для этих целей схема методики измерений и реализующая ее конструкция устройства (рисунок 8) основана на результатах проведенных нами ранее исследований по трансформации и рассеянию волн Рэлея и Стоунли на акустической скользящей нагрузке [6]. При этом было показано, что в некотором угловом диапазоне варьирования β_{κ} обнаружена возрастающая зависимость амплитуды возбуждаемой и принимаемой ПАВ.

Суть предложенного заключается в том, что между исследуемым объектом и преобразователем поверхностных волн ПЭП помещается со-

гласующий звукопроводный слой в виде клина с оптимально выбранным углом β_{k} , при котором наблюдается максимальный коэффициент двойного прохождения поверхностной волны $K_{S}^{0} = D_{e} D_{r}$, где D_{e} и D_{r} , – коэффициенты прохождения ПАВ в прямом и обратном направлении локальной области границы контакта, лежащей в окрестности z = x = Z = X = 0.



Рисунок 8 – Предложенная схема устройства для возбуждения (приема) поверхностных волн в материалах с разной скоростью (*a*) и пояснение к характеру распределения нормальной *u* (1) и тангенциальной *w* (2) составляющей смещений в поверхностном слое стали (*b*): 1 – преобразователь поверхностных акустических волн; 2 – акустически согласующая призма; 3 – внешняя контактная поверхность; 4 – рабочая поверхность; 5 – контролируемый объект

Figure 8 – Suggested scheme of ultrasonic arrangement for excitation (receiving) surface waves in materials with different ultrasonic velocity (*a*) and distribution of normal u (1) and tangential w (2) of constituent of displacements in a steel subsurface layer (*b*): 1 is ultrasonic probe of the surface waves; 2 is acoustically adopted prism of the wedged-shaped form; 3 is external contact surface; 4 is working surface; 5 is object to control

Анализ распределения поля смещений в поверхностном слое твердых тел (рисунок 8*b*), а также предварительные экспериментальные исследования показали существование оптимальных условий передачи-приема ПАВ, при которых коэффициент двойного прохождения ПАВ $K_s^* = K_s^*(\beta_k, \nu)$ максимален и четко выражен. Экспериментально установлено, что введение дополнительного клиновидного звукопровода снижает величину K_s^* не более, чем на 13–14 дБ, по сравнению со стандартным случаем, когда идет непосредственная (без клина) передача ПАВ в объект указанным на рисунке 8 наклонным преобразователем – с призмой из полимера.

Отметим, что прохождение ПАВ через поверхность, контактирующую с другим объектом, сопровождается трансформацией и отражением волн, что зависит от граничных условий закрепления смещений в волне [7, 8], которая в данном случае скользящая и реализуется через смазку. Физическая же сущность предложенного механизма передачи-приема ПАВ в материалы с разной скоростью ПАВ заключается в том, что превалирующая часть энергии, проходящей по поверхности клина волны, заключена в слое толщиной $\approx \lambda_c/2$, и по мере распространения по поверхности клина 3 волны эффективность ее передачи в объект будет наблюдаться в области $\Delta x < \lambda_c (2\sin\beta_c)^{-1}$. При этом превалирующей энергией обладает нормальная к поверхности 3 составляющая смещений и., образующая с осью Х угол В. При этом для $\beta_c < \pi/6$ $u_z = u \cos\beta_c \approx u [1-0,5(\beta_c)^2]$, а энергия волны в локальном объеме звукопровода для этой составляющей ~ $u^2[1-(\beta_c)^2]$.

Путем оптимизации конструкции и выбора β_c достигаются условия, при которых область локализации источника волн на границе клина с основой (в окрестности вершины клина) $\Delta x < \lambda$. При этом работа предложенного устройства подобна работе малоапертурного ПЭП, преобразующего продольные колебания в ПАВ [9]. Однако в силу ряда особенностей трансформации мод эффективность двойного преобразования предложенной схемы возбуждения ПАВ более чем на порядок лучше. Шумовой же фон – значительно ниже, что позволяет прозвучивать изделия как в теневом, так и эхо-режимах.

Заключение

На основе представлений лучевой акустики проведен теоретический анализ и получены оценочные соотношения между геометрическими параметрами объектов с плоской и цилиндрической поверхностью, акустической базой принимающих акустический сигнал преобразователей, длиной волны подповерхностной и поверхностной моды, количеством осцилляций в импульсе, при которых обеспечиваются оптимальные условия для нивелирования акустического шума в акустическом тракте при измерении скорости ультразвука. Проведено сопоставление данных экспериментальных исследований с расчетными согласно используемой упрощенной теоретической модели.

Определены условия, устраняющие влияние вращающихся мод на измерительный процесс при прозвучивании цилиндрического объекта поверхностной волной вдоль его оси, а также предложено использовать условия интерференции прямой и вращающихся мод для контроля поверхностной структуры таких материалов по данным сравнения скорости волн, движущихся под разными углами к образующей поверхности.

Изучена возможность и экспериментально апробирована предложенная схема возбуждения-приема поверхностных волн в материалах с разной скоростью, изменяющейся на 30–35 % и более, что достигается путем введения дополнительного акустически согласующего звукопроводного элемента в виде клина между наклонным преобразователем поверхностной волны и исследуемым объектом.

В результате анализа акустического тракта определены условия применения и получены выражения для определения скорости подповерхностной продольной волны в основе материала, расположенной под защитным покрытием в виде клина согласно предложенной компенсационной схеме измерений. Предложен способ уменьшения влияния интерференционных явлений на контроль качества материала и выявление в нем дефектов под защитным покрытием путем использования дополнительного акустического канала, параметры которого определяются углом призмы, рабочей частотой преобразователя и скоростью волн в контактирующих средах.

Список использованных источников

1. *Razygraev, A.N.* Ultrasonic Testing of Austenite Welded Joints in IY-300 Pipelines / A.N. Razygraev, N.P. Razygraev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2006. – Vol. 42, no. 10. – P. 682–691. **DOI:** 10.1134/S106183090610007X

2. *Kim, H.J.* Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves / Song S.-J. Golden, D.Y. Kim, S.D. Kwon, H.J. Kim // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Colorado, 2007. – Vol. 27B. – P. 1066–1073. **DOI:** https://doi.org/10.1063/1.2902550

3. *Kruger, S.E.* Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound / M. Lord, D. Levesque, S.E. Kruger, A.J. Bakker // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Golden. – Colorado, 2007. – Vol. 27A. – P. 279–285. **DOI:** https://doi.org/10.1063/1.2902670

4. *Baev, A.R.* Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: II. Effects of Some Boundary Conditions on Formation of Acoustic Fields / A.R. Baev, M.V. Asadchaya // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2005. – Vol. 41, no. 9. – P. 577–585. **DOI:** https://doi.org/10.1007/s11181-006-0004-9

5. *Pecorary, C.* Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // J. Acoust. Soc. Amer. – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072. **DOI:** https://doi.org/10.1121/1.1570437

6. Баев, А.Р. Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница контакта / А.Р. Баев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 28–39. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

7. Jerzak, W.I. Modeling Rayleigh and Stoneley waves and other interface and boundary effects with the parabolic equation / W.I. Jerzak, W.L. Siegmann, M.D. Collins // J. Acoust Soc Am. – 2005 Jun. – Vol. 117(6). – P. 497–34503. **DOI:** https://doi.org/10.1121/1.1893245

8. *Abbakumov, K.E.* Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact/K.E. Abbakumov, V.A. Konovalov // Abstracts of 10th European conference on Nondestructive testing. – Moscow, 2010. – P. 173–175.

9. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А.М. Люткевич, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

10. *Abbakumov, K.E.* Influence of a loss in the Acoustic contakt on the Propagation of Stoneley waves near the Boundary Between Solid Half-Spaces / K.E. Abbakumov, R.S. Konovalov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2008. – Vol. 44, no. 3. – P. 196–201. **DOI:** 10.1134/S1061830908030054

References

1. Razygraev, N.P., Razygraev, A.N. Ultrasonic testing of austenite welded joints in y-300 pipelines. *Russian* *Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 682–691. **DOI:**10.1134/s106183090610007x.

2. Golden Song S.-J., Kim D.Y., Kwon S.D., Kim H.J. Evaluation of thin coating layers using Rayleighlike waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Colorado, 2007, vol. 27B, pp. 1066–1073.

3. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laserultrasound.ReviewofProgressinQuantitativeNondestructive Evaluation, Golden, Colorado, 2007, vol. 27A, pp. 279–285. **DOI:** https://doi.org/10.1063/1.2902670

4. Baev A.R., Asadchaya M.V. Specific Features of Excitation and Propagation of Longitudinal and Transverse Subsurface Waves in Solids: II. Effects of Some Boundary Conditions on Formation of Acoustic Fields. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, no. 9, pp. 577–585. **DOI:** https://doi.org/10.1007/s11181-006-0004-9

5. Pecorary C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // J. Acoust. Soc. Amer. – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072. **DOI:** https://doi.org/10.1121/1.1570437

6. Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I., Lark K.G., Gill N.N. [Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding]. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian). **DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

7. Jerzak W.I., Siegmann W.L., Collins M.D. Modeling Rayleigh and Stoneley waves and other interface and boundary effects with the parabolic equation. J. Acoust Soc Am, 2005 Jun., vol. 117(6), pp. 497–34503. **DOI:** https://doi.org/10.1121/1.1893245

8. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact. *Abstracts of 10th European conference on Nondestructive testing*, Moscow, 2010, pp. 173–175.

9. Ljutkevich A.M., Zhukov A.V., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. [Acoustical fields of the probes with small aperture. Transverse waves, radiated by rectangularsource of the normal force]. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

10. Abbakumov K.E., Konovalov R.S. Influence of a Loss in the Acoustic Contact on the Propagation of Stoneley Waves near the Boundary between Solid Half-Spaces. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 196–201. **DOI:** 10.1134/S1061830908030054

УДК 681.2.778.4

Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии

Зайцева Е.Г.¹, Кислюк А.А.¹, Ларионова Т.О.², Дубина Н.Н.¹

¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь ²Приборостроительный завод «Оптрон», ул. Ф. Скорины, 52, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 27.09.2018 Принята к печати 30.10.2018

Анализ известных методов записи и воспроизведения объемного изображения позволяет выделить два различных подхода. Первый заключается в формировании стереоскопических изображений, второй обеспечивает создание оптической модели объекта и включает как разновидность группу методов интегральной фотографии.

Использование методов интегральной фотографии для записи и воспроизведения объемных изображений является актуальным вследствие отсутствия недостатков, присущих стереоскопическим методам, и относительной простоты технической реализации. Наличие линзового растра в данном методе является возможным источником появления искажений изображения. Целью настоящей работы являлось установление диапазона параметров линзовой системы для интегральной фотографии, а именно, допустимых значений шага линзового растра при условии отсутствия искажений, вызванных наличием этого растра.

Приведены виды возможных искажений и указаны источники их возникновения. Сформулированы требования к шагу линзового растра, исходя из условий отсутствия ложной информации, отсутствия прерывности изображения по глубине и в поперечном направлении, а также незаметности линзовых элементов матрицы воспроизведения.

Исследования показали, что шаг линзового растра лимитируется четырьмя неравенствами, причем первые три из них ограничивают значение шага снизу, а четвертое – сверху. Произведен анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы. Границы допустимых значений шага зависят от четырех групп параметров, связанных с другими размерами растра, расположением объектов съемки, параметрами воспроизведения и наблюдения. Приведен результат использования методики в виде зависимости допустимого диапазона шага линзового растра от поперечной координаты записываемой точки при фиксированных значениях других параметров.

Ключевые слова: интегральная фотография, линзовый растр, искажения.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Зайцева Е.Г.	Zaytseva E.G.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: egzaytseva@bntu.by	e-mail: egzaytseva@bntu.by
Лля интипослния.	For citation:
	Tor cuuton.
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.	Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N.
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н. Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии.	Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N. [Lens Faster as a Source of Distortions in Integral Photography].
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н. Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии. Приборы и методы измерений.	Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N. [Lens Faster as a Source of Distortions in Integral Photography]. Devices and Methods of Measurements.
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н. Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 4. – С. 337–346.	Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N. [Lens Faster as a Source of Distortions in Integral Photography]. <i>Devices and Methods of Measurements.</i> 2018, vol. 9, no. 4, pp. 337–346 (in Russian).

Lens Raster as a Source of Distortions in Integral Photography

Zaytseva E.G.¹, Kisliuk A.A.¹, Laryonova T.O.², Dubina N.N.¹

¹Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus ²JSC Instrument-making plant «Optron», Skaryna F. str., 52, Minsk 220141, Belarus

Received 27.09.2018 Accepted for publication 30.10.2018

Abstract

Analysis of methods for recording and reproducing a three-dimensional image allows to distinguish two different approaches. The first approach consists in formation of stereoscopic images, the second one provides the formation of an optical object model and includes particularly a group of integral photography methods .

The use of integral photography methods for recording and reproducing volumetric images is relevant due to the lack of flaws inherent for stereoscopic methods and relative simplicity of technical implementation. Lens raster used in this method is a possible source of image distortion. This paper aim is to determine the range of parameters of the lens system, namely, the allowable values of the pitch of the lens raster, providing distortions absence caused this raster.

Types of possible distortions and sources of their occurrence are indicated. The requirements for the pitch of the lenticular raster are formulated, based on conditions of false information absence, absence of discontinuity of the image in depth and in the transverse direction, and invisibility of lens elements of the reproduction matrix.

Studies shoed that the lenticular pitch is limited by the four inequalities, three of which limit the pitch value from below, and the fourth one from above. A set of conditions limiting the step of the lens matrix was analyzed. The boundaries of allowable step values depend on four groups of parameters: raster dimensions, location of the subjects, reproduction and observation parameters. Result of the method usage as a dependence of the allowable range of the pitch of the lenticular raster on transverse coordinate of the recorded point with fixed values of other parameters is presented.

Keywords: integral photography, lens raster, distortions.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Абрес бля переписки:	Address for correspondence:
Зайцева Е.Г.	Zaytseva E.G.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: egzaytseva@bntu.by	e-mail: egzaytseva@bntu.by
	For citation:
Зайцева Е.Г., Кислюк А.А., Ларионова Т.О., Дубина Н.Н.	Zaytseva E.G., Kisliuk A.A., Laryonova T.O., Dubina N.N.
Линзовый растр как источник искажений в интегральной фотографии.	[Lens Faster as a Source of Distortions in Integral Photography].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 337–346.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 337–346 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-337-346

Введение

Анализ [1, 2] известных методов записи и воспроизведения объемного изображения позволяет выделить два различных подхода. Первый подход заключается в записи или синтезе одной или множества пар изображений, причем каждое из пары при воспроизведении предназначено для наблюдения одним глазом и является незаметным для другого глаза. Группа соответствующих методов объединяет обычную стереоскопию (использование одной пары изображений) и параллакс-панорамные методики (использование множества стереопар) [3, 4]. Общей проблемой для стереоскопических методов является расхождение расстояний аккомодации и конвергенции. В системах, использующих второй подход, такая проблема отсутствует. Здесь при воспроизведении необходимо создать в трехмерном пространстве элементы, являющиеся источником излучения и образующие оптическую модель объекта.

Известно несколько методов получения оптических моделей. Наибольшее распространение в настоящее время получили два: голография и интегральная фотография. Если применение голографических методов требует наличия достаточно сложного оборудования, большой скорости обработки информации, то интегральные методы предусматривают наличие традиционных оптических элементов (линз, зеркал), не требуют большого объема расчетных операций, кроме того, на основе полученной информации возможно синтезировать голограммы [5].

Запись методом интегральной фотографии предусматривает преобразование трехмерного объекта в совокупность двумерных плоских изображений, полученных из разных точек зрения (ракурсов). Это возможно осуществить, применяя линзовый растр [6]. Очевидно, что записывать таким образом информацию возможно не только в видимом диапазоне, но и в инфракрасном [7], ультрафиолетовом, а воспроизводить - в видимом. Соответственно, возможен и обратный вариант - на основании записанных в видимом диапазоне изображений формировать объемные инфракрасные [8] и ультрафиолетовые поля, а также их комбинации с видимыми объемными изображениями. Источником информации для воспроизведения могут быть и изображения, синтезированные компьютерным способом.

Особенностью многолинзовых 3D-систем по сравнению с традиционными 2D-системами

является наличие дополнительного дискретизатора (линзовый растр), который может вносить в изображение дополнительные искажения. Методики расчета параметров стереоскопических систем, в том числе и с линзовыми растрами, приводятся в большом количестве источников, например [1, 6, 9]. Для систем интегральной фотографии с линзовым растром известны расчеты зон наблюдения, разрешающей способности, функции передачи модуляции элементов, геометрические расчеты, связанные с масштабом и параллаксом [1, 2, 6]. Очевидно, что, кроме вышеперечисленных параметров, для оптимизации многолинзовой системы интегральной фотографии в расчет необходимо внести ограничения, связанные с искажениями из-за наличия линзового растра. Известна методика расчета и критерии оценки растровых искажений применительно к полиграфическим изображениям [10], но последние имеют, в отличие от видео- и фотоизображений, всего 2 уровня яркости.

На основании вышеизложенного целью настоящей работы являлось установление диапазона параметров линзовой системы для интегральной фотографии, а именно, допустимых значений шага линзового растра при условии отсутствия искажений, вызванных наличием этого растра. Искажения при не корректно выбранном шаге линзового растра могут проявляться как:

- ложная информация;

– прерывистость изображения по глубине;

 прерывистость изображения в поперечном направлении;

– заметность линзовой структуры растра.

Для достижения цели исследования необходимо, во-первых, установить причину возникновения каждого вида искажений, во-вторых для каждого источника искажений получить математические зависимости, устанавливающие связь ограничений шага растра с другими параметрами, в-третьих, сопоставив полученные зависимости и рассматривая их как систему неравенств, определить диапазон допустимых значений шага линзового растра.

Допустимые значения шага линзового растра при отсутствии ложной информации

Ложная информация в воспроизводимом методом интегральной фотографии изображении может появится по следующим причинам. Во-первых, это неправильное сочетание шагов линзового растра и цифровой матрицы как при видеосъемке, так и при воспроизведении, приводящее к возникновению муар-эффекта. В соответствии с теоремой отсчетов шаг линзовой матрицы должен не менее чем в 2 раза превышать шаг цифровой. Если для процесса видеосъемки такая ситуация практически не возможна, так как шаг линзовой матрицы намного больше шага цифровой, то при воспроизведении эти шаги могут быть соизмеримы из-за крупного размера пикселей цифровых матриц. Данное условие не анализируется в настоящем исследовании, так как принято, что соотношение шагов линзовой и цифровой матриц при воспроизведении соответствует теореме отсчетов.

Во-вторых, возможным источником ложной информации при воспроизведении является отсутствие ограничения поля зрения элементов линзового растра при видеосъемке. При этом возможна ситуация, когда изображение точки объекта, построенное на цифровой матрице одной линзой, попадет на участок матрицы, предназначенный для изображений, которые строятся другой линзой. При воспроизведении это изображение воспроизведется линзой, не соответствующей записываемой, как ложная информация. Предотвратить появление ложной информации такого происхождения возможно, ограничив определенным образом шаг линзовой матрицы при видеосъемке.

На рисунке 1 представлена схема построения изображения произвольной точки А объекта і-м элементом видеосъемочной линзовой матрицы (і – номер линзы, начиная от начала координат, находящегося в точке пересечения горизонтальной и вертикальной осей матрицы). Ось Х направлена параллельно плоскости матрицы-преобразователя, ось Z перпендикулярна этой плоскости, а точка A имеет соответственно координаты $X_{_{\!A}}$ и Z₄. Из рисунка 1 видно, что изображение точки A_i -й линзой удалено по оси X на Δi относительно оси симметрии линзы. Если поле зрения линзовых элементов конструктивно не ограничено, то для предотвращения появления искажений необходимо, чтобы расстояние Δi не превышало половину шага линзового растра t_w, равного поперечному размеру линзы, т.е.:

$$\Delta_i \le \frac{\iota_w}{2}.\tag{1}$$

Если указанное условие не будет соблюдаться, записанное *i*-й линзой изображение точки *A* будет воспроизводится другой линзой, и восстановленное изображение будет отличатся от записываемого, т.е. возникнут искажения.



Рисунок 1 – Схема построения изображения произвольной точки объекта линзовым элементом матрицы при записи изображения

Figure 1 – Diagram of image formation of an arbitrary point of an object with a lens element of the matrix when recording an image

Из рисунка 1 очевидно, что:

$$\frac{\Delta_i}{m} = \frac{-X_A + p_i}{-Z_A},\tag{2}$$

где *m* – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы; *p_i* – расстояние между началом координат и изображением точки, построенным *i*-й линзой; прочие обозначения приведены ранее.

С учетом того, что $p_i = kt_{vc}$,

где

$$k = \begin{cases} i - \frac{1}{2} & \text{для четного числа линз в матрице} \\ i & \text{для нечетного числа линз в матрице} \end{cases}$$

уравнение (2) можно привести к виду:

$$\frac{\Delta_i}{m} = \frac{-X_A + kt_{vc}}{-Z_A}.$$
(3)

Неравенство (1) и уравнение (3) позволяют получить условие для ограничения шага линз в виде:

$$t_{vc} \ge \frac{2X_A m}{2mk + Z_A}.$$
(4)

Анализ неравенства (4) позволяет сделать вывод, что значение нижнего порога t_{vc} будет максимально для линзы растра с осью симметрии *Z*, когда k = 0. При этом неравенство (4) примет вид:

$$t_{vc} \ge \frac{2X_A m}{Z_A}.$$
(5)

Их условия (5) следует, что нижний (далее – первый нижний) предел шага линзового растра видеосъемочной матрицы, обусловленный отсутствием ограничения поля зрения линзовых элементов, определятся координатами записываемой точки изображения и расстоянием между линзой и матрицей. Так как на рисунке 1 ось продольной координаты Z направлена от линзового растра к цифровой матрице, координата Z₄ записываемой точки А будет всегда отрицательной и знак порогового значения шага будет зависеть от знака поперечной координаты X₄ точки A. Отрицательное значение порога (для положительных значений X_A , т.е. расположения точки Aнад осью Z) означает, что для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра, ограничение шага по предотвращению появления ложной информации отсутствует. Соответственно, это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра.

Допустимые значения шага линзового растра при отсутствии прерывности изображения по глубине

Зрительный анализатор человека не различает разность расстояний между точками по глубине сцены, если при переводе взгляда с одной точки на другую угол поворота глазных яблок составляет менее 30" [6]. Такой предельный угол поворота называется предельно малым углом диспаратности d α . Модуль линейного порога dZ зависит не только от значения углового порога d α , но и от расположения зрителя и его глазного базиса (расстояния между центрами вращения глазных яблок) [6]:

$$dZ = \frac{Z_{eye}^2 d\alpha}{B_{eye}},$$
(6)

где Z_{eye} – расстояние между зрителем и рассматриваемой точкой; B_{eye} – глазной базис; da – предельно малый угол диспаратности, выраженный в радианах.

Из условия (6) следует, что зрительный анализатор человека будет воспринимать дискретное по глубине изображение непрерывным, если расстояние по глубине между дискретными элементами не будет превышать dZ. Следовательно, при воспроизведении объемного изображения методом интегральной фотографии для его непрерывности по глубине необходимо, чтобы расстояние вдоль оси линзовых элементов между воспроизводимыми точками не превышало линейный порог dZ.

На рисунке 2 представлена схема воспроизведения объемного изображения точек *A* и *B*, расположенных вдоль оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека, причем расстояние *AB* не превышает пороговое значение dZ.



Рисунок 2 – Схема воспроизведения объемного изображения точек *A* и *B*, расположенных вдоль оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека

Figure 2 – Diagram of reproducing a three-dimensional image of points A and B located along the optical axis of lens elements, and observing them with a human's visual system

Так как линзовая матрица представляет из себя дискретную систему, то запись объемного изображения осуществляется как совокупность отдельных плоских изображений, снятых из разных точек. При этом возможен случай, когда изображение одной из точек A и B не воспроизведется на матрице одной и той же линзой, что может вызвать дефект при воспроизведении A и B, а следовательно, и прерывистость изображения по глубине. Поэтому, чтобы воспроизвести точки A и B, соответствующие линейному порогу dZ в пространстве по их изображениям на матрице, необходимо, чтобы расстояние между их изображениями A_i и B_i не превышало шаг проекционного линзового растра t, т.е.:

$$\Delta_{A_i} - \Delta_{B_i} \le t. \tag{7}$$

Найдем связь между значениями *AB* и *A*_{*i*}*B*_{*i*}. Из рисунка 2 следует:

$$\frac{\Delta_{A_i}}{m} = \frac{-X_A + p_{i_{pr}}}{-Z_A},$$

где Δ_{A_i} – расстояние от оси симметрии *i*-й линзы до *i*-го изображения точки *A*, равное $O_i A_i$ на рисунке 2; *i* – номер линзы, начиная от начала координат; p_{ipr} – расстояние между осью *Z* на рисунке 2 и осью *i*-й линзы; X_A и Z_A – координаты точки *A*; *m* – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы.

Отсюда:

$$\Delta_{A_{i}} = \frac{\left(-X_{A} + p_{i_{pr}}\right)m}{-Z_{A}}.$$
(8)

Аналогично для точки *В* с учетом:

$$- dZ - Z_B = -Z_A \tag{9}$$

получаем:

$$\Delta_{B_i} = \frac{\left(-X_B + p_{i_{pr}}\right)m}{-Z_A - \mathrm{d}Z},\tag{10}$$

где X_{B} и Z_{B} – координаты точки B.

Расстояние между изображениями A_i и B_i точек A и B можно найти как разность правых частей формул (8) и (10). С учетом того, что:

$$p_{i_{pr}} = kt_{vc}, \ X_A = X_B$$

подстановка этой разности в неравенство (7) позволяет получить условие непрерывности изображения по глубине в виде:

$$t \ge \frac{X_A m dZ}{mk dZ - Z_A (Z_A + dZ)}.$$
(11)

Неравенство (11) получено для проекционной матрицы. Чтобы сформулировать требования к матрице для видеосъемки, необходимо привести шаг проекционной матрицы к шагу видеосъемочной с учетом масштаба увеличения *M* при проекции:

$$M = \frac{t}{t_{vc}},\tag{12}$$

где t – шаг проекционной матрицы; t_{vc} – шаг видеосъемочной матрицы.

При сохранении геометрического подобия записываемого и воспроизводимого изображений отношения координат X_{pr} , Y_{pr} точки воспроизводимого проекционной матрицей изображения и координат X_{vc} , Y_{vc} точки записываемого видеосъемочной матрицей объекта, а также отношение расстояний m_{pr} и m_{vc} между соответствующими линзами и матрицами должно быть постоянным и равным масштабу увеличения M [6]. С учетом вышеизложенного, неравенство (11) принимает вид:

$$t \ge \frac{X_A m}{\left(mk - Z_A \left(1 + \frac{Z_A M}{dZ}\right)\right)},\tag{13}$$

где X_A и Z_A – координаты записываемой точки A при видеосъемке; m – расстояние между видеосъемочными линзой и матрицей.

Анализ неравенства (13) позволяет сделать вывод, что значение нижнего порога t_{vc} , как и в случае неограниченного поля зрения линз, максимально для линзы растра, расположенной на оси симметрии Z (при k = 0). При этом неравенство (13) примет вид:

$$t \ge \frac{-X_A m}{Z_A \left(1 + \frac{Z_A M}{dZ}\right)},\tag{14}$$

где dZ вычисляется по формуле (6) и зависит от расстояния Z_{eye} между наблюдателем и точкой воспроизводимого изображения.

Из выражения (14) следует, что этот нижний (далее - второй нижний) предел шага линзового растра при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения по глубине, зависит от координат записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции. Так как при различных сочетаниях значений параметров в правой части неравенства (14) второй нижний предел может принимать как положительные, так и отрицательные значения, значит, существуют области параметров из правой части неравенства (14), при которых ограничение по второму пределу отсутствует.

Допустимые значения шага линзового растра при отсутствии прерывности изображения в поперечном направлении

Аналогично случаю прерывности изображения по глубине возможен вариант, когда при проекции изображения двух точек снятого объекта, лежащих на отрезке, перпендикулярном оптической оси линз, не воспроизведутся одной линзой (рисунок 3). Наблюдатель не заметит данного дефекта, если длина отрезка, образованного такими «исчезнувшими» точками, не превышает линейный предел разрешения зрительного анализатора dX в поперечном направлении. Поэтому для предотвращения дефекта «прерывистость изображения в поперечном направлении» необходимо, чтобы промежутки между дискретно воспроизводимыми точками K, A, B, C, D (рисунок 3) не превышали линейный предел dX. Значение этого предела определяется предельным угловым разрешением γ зрительного анализатора, равным 1' [6], и расстоянием Z_{eye} между зрителем и рассматриваемой точкой. Вышеуказанные величины связаны зависимостью:

$$\mathrm{d}X = Z_{eve}\gamma,\tag{15}$$

где ү выражается в радианах.



Рисунок 3 – Схема воспроизведения объемного изображения точек на отрезке, перпендикулярном оптической оси линзовых элементов, и их наблюдения зрительным анализатором человека: 1, 2, 3, 4 – линзовые элементы; 5 – отрезок, где расположены объемные изображения точек; 6 – матрица воспроизведения; 7 – глаз наблюдателя

Figure 3 – Diagram of reproducing a three-dimensional image of points on a segment perpendicular to the optical axis of lens elements, and observing them with a human's visual system: 1, 2, 3, 4 – lens elements; 5 – section where three-dimensional images of points are located; 6 – reproduction matrix; 7 – the eye of the observer

Следовательно, необходимым условием для отсутствия прерывистости при изменении ракурса является воспроизведение одной линзой изображений (например, a_2 и b_2 на рисунке 3) двух точек (например, A и B на рисунке 3), составляющих линейный порог разрешения зрительного анализатора, т.е. расстояние между этими изображениями не должно превышать шаг линзового растра:

$$\Delta_{B_i} - \Delta_{A_i} \le t, \tag{16}$$

где Δ_{A_i} – расстояние от оси симметрии *i*-й линзы до *i*-го изображения точки *A*; Δ_{B_i} – расстояние от оси симметрии *i*-й линзы до *i*-го изображения точки *B*; *t* – шаг линзового растра.

Значения Δ_{A_i} и Δ_{B_i} принимаются положительными, если отрезки Δ_{A_i} и Δ_{B_i} расположены над осью линзы и отрицательными, если под осью. Значения Δ_{A_i} и Δ_{B_i} из рисунка 3 равны:

$$\Delta_{A_i} = -\frac{\left(-X_A + p_{i_{pr}}\right)m}{-Z_i}; \tag{17}$$

$$\Delta_{B_i} = \frac{\left(-X_B + p_{i_{pr}}\right)m}{-Z_i},\tag{18}$$

где p_i – расстояние между осью Z и осью *i*-й линзы; X_A и X_B – вертикальные координаты точек A и B; m – расстояние от задней главной плоскости линзы до матрицы.

Очевидно, что:

X

$$A_{A} = X_{B} + \mathrm{d}X,\tag{19}$$

$$Z_B = Z_A = Z_i, (20)$$

где Z_A и Z_B – гороизонтальные координаты точек A и B.

С учетом формул (12, 17–20), связи параметров видеосъемочной и проекционной матриц и в результате дальнейших преобразований выражение (16) примет вид:

$$t_{vc} \ge \frac{m \mathrm{d}X}{-MZ_i},\tag{21}$$

где t_{vc} – шаг видеосъемочной матрицы; M – масштаб увеличения при проекции; dX вычисляется по формуле (15).

Анализ неравенства (21) показывает, что нижний (далее - третий нижний) предел шага линзового растра при видеосъемке, обусловленный отсутствием прерывности изображения в поперечном направлении, зависит от продольной координаты Z_{B} записываемой точки изображения, расстояния от наблюдателя до этой точки, расстояния между видеосъемочными линзой и матрицей, а также от масштаба увеличения при проекции и не зависит от поперечной координаты точки Х_в. Так как координата Z₄ всегда отрицательна, по аналогии с первым ограничением и с учетом отрицательного знака в правой части неравенства (21) для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра, ограничение шага по предотвращению ложной информации отсутствует. Соответственно, это условие надо принимать во внимание для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра.

Допустимые значения шага линзового растра при незаметности линзовых элементов матрицы воспроизведения

Чтобы линзовая матрица была незаметна наблюдателю при воспроизведении, необходимо, чтобы шаг воспроизводящего линзового растра не превышал линейный предел разрешения dZ_{dist} зрительного анализатора наблюдателя, причем:

$$\mathrm{d}Z_{dist} = Z_{dist}\gamma,\tag{22}$$

где Z_{dist} – расстояние между зрителем и воспроизводящим линзовым растром; γ – предельное угловое разрешение зрительного анализатора, равное 1' [6].

Очевидно, что:

$$Z_{dist} = Z_{eye} + |Z_A|, \tag{23}$$

где Z_{eye} – расстояние между зрителем и рассматриваемой точкой; Z_A – продольная координата точки A относительно проекционного линзового растра.

В результате подстановки (23) в (22) и перехода от проекционной матрицы к видеосъемочной с учетом масштаба *М* увеличения при проекции возможно получить неравенство для ограничения шага видеосъемочной матрицы сверху:

$$t_{vc} \le \gamma \left(\frac{Z_{eve}}{M} + \left| Z_A \right| \right), \tag{24}$$

где Z_A – продольная координата точки A относительно видеосъемочного линзового растра, γ выражается в радианах.

Так как правая часть неравенства (24) всегда положительна, ограничение по верхнему пределу в соответствии с неравенством (24) надо принимать во внимание при любых значениях координат записываемой точки.

Анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы

Анализ четырех неравенств (5, 14, 21, 24), ограничивающих шаг линзового растра при видеосъемке для предотвращения искажений, показывает, что значение шага зависит от четырех групп параметров. Первая группа связана с другими параметрами линзового растра (расстояние *m* от задней главной плоскости линзы растра до цифровой матрицы зависит от фокусного расстояния линзы). Вторая группа определяется расположением объектов съемки (координаты точки записываемого объекта X_A и Z_A). Третья группа

включает параметры, связанные с устройствами для воспроизведения изображения (масштаб увеличения М при проекции). Четвертая определяется условиями наблюдения и содержит как варьируемые в полной мере параметры (расстояние Z_{eve} между зрителем и рассматриваемой точкой), так и параметры, которые незначительно отличаются у отдельных наблюдателей, и при расчетах используются их средние значения (глазной базис В_{ече}, предельное угловое разрешение у зрительного анализатора, предельно малый угол диспаратности dα). Из вышеизложенного следует, что при выборе шага линзового растра необходимо согласовывать его с другими параметрами растра: фокусным расстоянием линз, расстоянием до цифровой матрицы. Необходимо также иметь сведения о размерах экранов для проекции, расположении зрителя относительно проекционных устройств. Кроме того, требуется информация о размерах и расположении снимаемого объекта относительно устройства для видеосъемки.

Исследование неравенств (5, 14, 21, 23) позволяет сделать вывод, что первые три условия ограничивают шаг снизу, а последнее – сверху. Так как условие (5) надо принимать во внимание для точек, расположенных ниже оси симметрии линзового растра, а условие (23) – для точек, расположенных выше оси симметрии линзового растра, то для точек, лежащих выше оси симметрии матрицы, необходимо решать систему неравенств (16, 21, 24), а для точек, лежащих ниже оси симметрии матрицы, – систему (5, 14, 24).

В качестве примера использования разработанной методики были рассчитаны зависимости четырех вышеперечисленных значений порогов от координаты Z₄, перпендикулярной плоскости матрицы, при следующих фиксированных значениях параметров: m = 20 мм, M = 10, $Z_{eve} = 2000$ мм, $X_{A} = 100$ мм. Координаты Z_{A} были заданы в диапазоне от -500 мм до -200 мм. Анализ результатов расчета позволил заключить, что в данном случае диапазон допустимых значений шага растра ограничивается неравенствами (21) снизу и (24) сверху. Графики зависимости пороговых значений шага t_{w} линзового растра видеосъемочной матрицы от продольной координаты Z₄ записываемой точки А представлены на рисунке 4, причем график нижней границы допустимых значений показан сплошной красной линией, а график верхней границы – пунктирной синей.


Рисунок 4 – Графики зависимости пороговых значений шага t_{vc} линзового растра от координаты Z_A при фиксированных значениях других параметров (приведены выше)

Figure 4 – Graphs of the dependence of the threshold values of the pitch t_{vc} of the lenticular raster on coordinate Z_A with fixed values of other parameters (given above)

Из рисунка видно, что при фиксированных значениях других параметров по мере приближения записываемой точки к видеосъемочной матрице диапазон допустимых значений шага линзовой матрицы сужается. В большей степени это сужение обусловлено более быстрым падением верхнего предела, чем ростом нижнего. Так как для более удаленных точек диапазон шире, то можно сделать вывод, что если шаг растра корректно выбран для самой близкой точки видеосъемки, то это значение шага будет приемлемо и для более удаленных точек.

Заключение

Обоснована актуальность проблемы исследования допустимых параметров линзового растра для предотвращения возможных искажений при записи и воспроизведении изображений методом интегральной фотографии. Приведен перечень возможных проявлений искажений, указаны конкретные причины возникновения каждого вида искажений. Сформулированы требования к шагу линзовой матрицы, исходя из исключения возможности появления этих искажений.

В результате исследований оказалось, что шаг линзового растра лимитируется четырьмя вышеприведенными неравенствами, причем первые три из них ограничивают значение шага снизу, а четвертое – сверху. Произведен анализ совокупности условий, ограничивающих шаг линзовой матрицы. Границы допустимых значений шага зависят от четырех групп параметров, связанных с другими размерами растра, расположением объектов съемки, параметрами воспроизведения и наблюдения. Приведен результат использования методики в виде зависимости допустимого диапазона шага линзового растра от поперечной координаты записываемой точки при фиксированных значениях других параметров.

Список использованных источников

1. *Dufaux, F.* Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering / F. Dufaux, B. Pesquet-Popescu, M. Cagnazzo. – UK, Chichester : Wiley& Sons, Ltd., 2013. – 518 p.

2. Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display / B. Javidi, F. Okano, J.-Y. Son (Eds.) // Springer Science+Business Media, LLC. – 2009. Mode of access: https://www.springer.com/us/book/9780387793344. – Date of access: 04.09.2016. **DOI:** 10.1007/978-0-387-79335-1

3. Кондратьев, Н.В. Особенности формирования объемного изображения в цифровом стереоскопическом кинематографе / Н.В. Кондратьев, Н.В. Елхов, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова // Мир техники кино. – 2011. – № 2. – С. 4–8.

4. Кондратьев, Н.В. Цифровой синтез многоракурсных стереоскопических изображений для безочковой растровой демонстрации / Н.В. Кондратьев, Н.В. Елхов, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова // Мир техники кино. – 2012. – № 2. – С. 21–25.

5. *Mishina, X.* Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography / X. Mishina, M. Okui, F. Okano // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45, issue 17. – P. 4026–4036. **DOI:** 10.1364/AO.45.004026

6. Дудников, Ю.А. Растровые системы для получения объемных изображений / Ю.А. Дудников, Б.К. Рожков. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отд., 1986. – 216 с.

7. Способ преобразования инфракрасного изображения объекта в видимое объемное и устройство для его осуществления: патент № 14668 Республики Беларусь / Е.Г. Зайцева, С.А. Саракач // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 4. – С. 128.

8. Способ селективного нагрева объектов инфракрасным излучением: патент № 19110 Республики Беларусь / Е.Г. Зайцева // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 2. – С. 103.

9. Чафонова, В.Г. Автоматический контроль и цифровая коррекция масштаба и взаимного поворота изображений стереопары / В.Г. Чафонова,

И.В. Газеева, Г.В. Тихомирова // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, вып. 1. – С. 112–120. **DOI:** 10.18287/2412-6179-2016-40-1-112-120

10. Желудев, Д.Е. Количественная оценка величины растровых искажений и геометрической точности воспроизведения деталей оригинала / Д.Е. Желудев // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008. – № 2(5). – С. 24–27.

References

1. Dufaux F., Pesquet-Popescu B., Cagnazzo M. Emerging Technologies for 3D Video: Creation, Coding, Transmission and Rendering, UK, Chichester, Wiley&Sons, Ltd., 2013, 518 p.

2. Javidi B., Okano F., Son J.-Y. (Eds.) Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display. *Springer Science+Business Media*, *LLC*, 2009. Mode of access: https://www.springer.com/us/book/9780387793344. Date of access: 04.09.2016. **DOI:** 10.1007/978-0-387-79335-1

3. Kondratyev N.V., Elhov N.V., Ovechkis Yu.N., Pautova L.V. [Features of the formation of three-dimensional image in digital stereoscopic cinema]. *World of cinema technology*, 2011, no. 2, pp. 4–8 (in Russian).

4. Kondratyev N.V., Elhov N.V., Ovechkis Yu.N., Pautova L.V. [Digital synthesis of multi-angle stereoscopicimages for aglasses-free raster demonstration]. *World of cinema technology*, 2012, no. 2, pp. 21–25 (in Russian). 5. Mishina X., Okui M., Okano F. Calculation of holograms from elemental images captured by integral photography. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, is. 17, pp. 4026–4036. **DOI:** 10.1364/AO.45.004026

6. Dudnikov A.Y., Rozhkov B.K. *Rastrovye sistemy dlya polucheniya ob'emnykh izobrazhenii* [Raster Systems for Stereoscopic Imaging]. Leningrad, Mechanical engineering Publ., Leningradbranch, 1986, 216 p. (in Russian).

7. Zaytseva E.G., Sarakach S.A. *Sposob preobrazovaniya infrakrasnogo izobrazheniya ob'ekta v vidimoe ob'emnoe i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of converting an infrared image of an object into a volumetric visible and a device for its implementation]. Patent RB, no. 14668, 2011.

8. Zaytseva E.G. *Sposob selektivnogo nagreva ob'ektov infrakrasnym izlucheniem* [The method of selective heating of objects by infrared radiation]. Patent RB, no. 19110, 2015.

9. Chafonova V.G., Gazeeva I.V., Tikhomirova G.V. [Automatic control and digital correction of scale and rotation mismatch in stereo pairs]. *Computer optics*, 2016, vol. 40, is. 1, pp. 112–120 (in Russian). **DOI:** 10.18287/2412-6179-2016-40-1-112-120

10. Zheludev D.E. [Quantitative assessment of the magnitude of raster distortion and the geometric accuracy of reproducing the details of the original]. *Design. Materials. Technology*, 2008, no. 2(5), pp. 24–27 (in Russian).

Методика исследования пространственного распределения параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и смежных с ним пространствах

Антошин А.А.¹, Волков С.А.²

¹Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь ²Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь

Поступила 11.10.2018 Принята к печати 12.11.2018

Статья посвящена проблеме повышения эффективности технических средств обнаружения пожара в жилых помещениях и смежных с ними пространствах. Целью настоящей работы являлась разработка методики исследования пространственного распределения продуктов горения, включая токсичные продукты удушающего и раздражающего действия как по высоте помещений стандартной квартиры в жилом доме, так и по ее площади, а также определение зависимости между контролируемыми пожарной сигнализацией параметрами окружающей среды в жилых помещениях и опасными факторами пожара.

Предложенная методика предусматривает измерение концентрации основных газообразных продуктов сгорания (удушающих и раздражающих), образующихся при горении материалов характерных для жилых помещений. Дано обоснование мест расположения средств измерения в помещении, где возник пожар, и в смежных с ним пространствах, учитывающие наиболее вероятное положение человека как во время эвакуации, так и во время отдыха. Показано влияние стадии пожара на величину потока оптического излучения, рассеянного дымом.

Полученные результаты позволят разработать методику испытаний пожарных извещателей, предназначенных для защиты жилых помещений и находящихся в них людей, сформулировать критерии эффективности функционирования (алгоритмы работы) извещателей, используемых для защиты жилых помещений.

Ключевые слова: извещатель пожарный, жилое помещение, токсичные газы, продукты горения, опасные факторы пожара.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358

Адрес для переписки: Волков С.А. Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь e-mail: volkovsa@tut.by	Address for correspondence: Volkau S.A. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus Soltysa str., 183a, Minsk 220046, Belarus e-mail: volkovsa@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Антошин А.А., Волков С.А.	Antoshyn A.A., Volkau S.A.
Методика исследования пространственного распределения	[Experimental Test Procedure of the Spatial Distribution
параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и	of Environmental Parameters and Products of Combustion
смежных с ним пространствах.	in a Residential Area and Adjacent Spaces].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 347–358.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 347–358 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358

Experimental Test Procedure of the Spatial Distribution of Environmental Parameters and Products of Combustion in a Residential Area and Adjacent Spaces

Antoshyn A.A.¹, Volkau S.A.²

¹Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus ²Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus Soltysa str., 183a, Minsk 220046, Belarus

Received 11.10.2018 Accepted for publication 12.11.2018

Abstract

This article is dedicated to the issue of efficiency increase of fire detection equipment in living accommodation and adjacent spaces. This research is intended to develop the testing methodology for spatial pattern of combustion products, including toxic gases with asphyxiant and irritant effects, in both height and area of rooms in a standard apartment building, as well as correlation identification between controlled by fire alarm parameters of environment in living rooms and dangerous fire factors.

Proposed methodology includes the concentration measurement of the basic gaseous combustion products (asphyxiant and irritant), generated in the process of materials burning in living accommodation. Justification of measurement facilities location in the fire scene and adjacent spaces is provided, considering the most likely position of a person during the evacuation and leisure time. The impact of fire stage on the flow rate of optical radiation diffused by smoke is shown.

The findings will enable to develop the testing methodology for fire detectors designed to protect living accommodations and people located in them, formulate the functioning effectiveness criteria (operation algorithms) for detectors, used in living accommodations.

Keywords: fire detector, living room, toxic gases, combustion gases, dangerous fire factors.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358

Адрес для переписки: Волков С.А. Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС Республики Беларусь ул. Солтыса, 183a, г. Минск 220046, Беларусь e-mail: volkovsa@tut.by	Address for correspondence: Volkau S.A. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus Soltysa str., 183a, Minsk 220046, Belarus e-mail: volkovsa@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Антошин А.А., Волков С.А.	Antoshyn A.A., Volkau S.A.
Методика исследования пространственного распределения	Experimental Test Procedure of the Spatial Distribution
параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и	of Environmental Parameters and Products of Combustion
смежных с ним пространствах.	in a Residential Area and Adjacent Spaces].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2018. – T. 9, № 4. – C. 347–358.	2018, vol. 9, no. 4, pp. 347–358 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358	DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-347-358

Введение

Согласно статистическим данным, основную часть пожаров составляют пожары в жилом секторе [1]. Для обнаружения пожара в жилых помещениях наиболее часто используют автономные дымовые пожарные извещатели (принимают решение о пожаре по величине потока ИК излучения рассеянного на частицах дыма). Также имеются пожарные извещатели с более широким набором принципов его обнаружения [2, 3]: ионизационные, тепловые максимальные и тепловые дифференциальные, газовые, дымовые точечные и комбинированные. Многие из этих извещателей определяют значения физических величин, факторов пожара, которые в ряде случаев не являются опасными. Поэтому для прогнозирования возникновения опасности на основе информации, получаемой от пожарных извещателей, необходимо знать, как связаны между собой параметры окружающей среды, контролируемые пожарными извещателями, и опасные факторы пожара, воздействующие на людей и материальные ценности в условиях разных типов пожара в помещении.

Попытка установить связь между факторами пожара и опасными факторами пожара предпринимались в работах [3, 4], где авторы стремились установить связь между удельной оптической плотностью окружающей среды, чувствительностью точечных дымовых пожарных извещателей, оптико-электронных и ионизационных, и относительной эффективной дозой, характеризующей воздействие на человека вдыхаемых им токсичных газов, образующихся при горении содержащей пенополиуретан мебели. В работе [4] в условиях тестового пожара контролировались угарный газ, углекислый газ и цианистый водород.

Важными для эффективной работы системы пожарной сигнализации являются критерии, лежащие в основе обоснования значений параметров окружающей среды, при достижении которых формируется сигнал пожар. Проблеме определения таких критериев посвящена работа [4], где определяются критерии для формирования сигнала «пожар» исходя из допустимых для человека значений опасных факторов пожара. В качестве таких границ для оценки воздействия теплоты и угарного газа предлагается использовать величину относительной эффективной дозы. Она не должна превышать 0,3. Кроме того, для определения критерия формирования сигнала «пожар» используют соотношение между требуемым и необходимым временем эвакуации в условиях пожара. В качестве фактора пожара, вызывающего формирование сигнала «пожар», в рассматриваемых случаях бралось значение оптической плотности задымленной среды при пламенном горении или тлении пенополиуретана.

Большое значение для обоснованности требований к пожарным извещателям для жилых помещений имеет скорость развития обнаруживаемого ими пожара. Именно с этой целью в работах [3, 5] рассматривалась динамика изменения опасных факторов пожара при горении современной мебели, основным компонентом которой является пенополиуретан. В работе [6] исследовалась динамика распределения температуры в горящем и смежном помещениях, не оборудованных системой дымоудаления.

В работе [7] сделана попытка сопоставить условия, которые создают при испытании пожарных извещателей в испытательном канале с характеристиками окружающей среды в условиях реального пожара. Сравнивалось изменение оптической плотности, температуры и концентрации углекислого и угарного газов в испытательном канале (FE/DE) при тлеющем или пламенном сжигании пенополиуретана и в полномасштабном эксперименте. Авторы показали, что в испытательном канале при выполнении необходимых требований можно воспроизвести условия реального пожара.

Следует также отметить, что сегодня на рынке пожарной автоматики появляются новые типы пожарных извещателей, например мультикритериальные, позволяющие принимать решение о пожаре из сравнения значений и характера изменения во времени разных параметров окружающей среды (температура, концентрация продуктов горения и др.). Тем не менее существующие методики испытаний извещателей оценивают их эффективность лишь по одному из показателей и не позволяют определить эффективность пожарного извещателя в реальной обстановке при пожаре в жилых помещениях.

Особенности воздействия на человека образующихся при пожаре газообразных токсичных веществ рассматривались в работах [8, 9] и ISO 1357¹.

¹Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data: ISO 13571:2012. – Availability. 15.09.2012. – ISO/TC 92/SC 3, 2012. – 28 p.

Согласно этому документу опасными для человека являются не только удушающие газы (угарный газ, цианистый водород и т.п.), но и раздражающие газы (хлористый водород, двуокись серы, двуокись азота, акролеин, формальдегид и др.). Состав газообразных продуктов, образующихся при термическом разложении пенополиуретана и некоторых других полимеров, изучался в работе [10], где было установлено, что при термическом разложении практически всех исследованных групп полимерных материалов (9 групп), помимо оксидов углерода, в среде содержатся оксиды азота, акролеин и формальдегид. Для некоторых групп материалов были выявлены оксиды серы и галогеноводороды. В случае пенополиуретана имеет место большой выход хлористого водорода. Следует отметить, что эти результаты получены в лабораторных условиях и не в полной мере отражают ситуацию реального пожара в помещении.

В работах [3, 5] условия проведения исследований наиболее полно соответствовали реальным в жилом помещении. Исследовано горение различных материалов и предметов интерьера, изучены распределение по высоте температуры, оптической плотности среды и концентрации угарного, углекислого газов как в горящем помещении, так и на путях эвакуации. В одном из тестов в небольшом количестве обнаружена синильная кислота. Однако следует отметить, что исследования были направлены в основном на определение эффективности различных типов пожарных извещателей, определялось время их реагирования при горении различных видов пожарной нагрузки в зависимости от их расположения. Исследование распределения токсичных газов и других параметров среды (например, температуры) по площади помещения с очагом пожара и смежных с ним пространствах не проводилось.

Анализ исследований показывает, что до сих пор остается недостаточно исследованным распределение продуктов горения (включая токсичные удушающие и особенно раздражающие газы) в жилых помещениях и смежных с ними пространствах как в горизонтальной плоскости, так и по высоте помещения. Важным является изучение распределения токсичных продуктов сгорания не только на путях эвакуации, но и в местах возгорания, так как, по статистике, наибольшее количество пожаров в жилом секторе происходит именно в зоне отдыха человека. Не установлены взаимосвязи между опасными факторами пожара и параметрами среды в помещении при пожаре.

Целью настоящей работы являлась разработка методики исследования распределения продуктов горения, включая токсичные продукты удушающего и раздражающего действия как по высоте помещений стандартной квартиры в жилом доме, так и по ее площади, а также определение связи параметров окружающей среды в жилых помещениях и смежных с ними пространствах с опасными факторами пожара, что позволит определить требования к пожарным извещателям и тестовым пожарам при проведении их испытаний.

Методика эксперимента

Исследование распределения продуктов горения в помещении при пожаре в условиях, максимально приближенных к реальным [3, 5], означает проведение исследований в жилом помещении с типовой планировкой и инженернотехническим оснащением (вентиляцией). Типовое жилище, как правило, имеет одну или несколько жилых комнат, имеющих выход в смежные помещения (коридор, прихожая и т.п.), кухню, санузлы и оборудовано естественной вентиляцией на кухне и в санузлах. Примером такого помещения может служить однокомнатная/ двухкомнатная квартира с отдельной кухней, объединенные между собой прихожей (рисунок 1). Материал стен – железобетонные панели, газосиликатные блоки, кирпич или дерево. Высота потолка – 2,5–3,0 м. На рисунке 1 указаны примерные размеры помещений. Вход в жилое помещение и кухню осуществляется через дверные проемы размерам $2,0 \times 0,9$ м.

В качестве горючего для тестовых пожаров в жилой (спальной) комнате предложен макет мягкой мебели, с помощью которого можно моделировать как пламенное горение, так и тление мягкой мебели. Макет мягкой мебели представляет собой две пластины пенополиуретана плотностью 28 кг/м³ размером $50 \times 50 \times 10$ см в чехлах из хлопчатобумажной ткани (для имитации тлеющего пожара) или синтетической ткани (для имитации пламенного пожара), расположенные под углом 90° друг к другу и образующие конструкцию Г-образной формы. Макет размещается на высоте 0,4–0,5 м от пола.



Рисунок 1 – План квартиры с указанием мест контроля параметров среды: 1-7 – точки размещения средств измерения; T – датчик измерения температуры; \mathcal{A} – датчик измерения оптической плотности среды; CO – датчик измерения угарного газа; $T\Pi$ – тестовый пожар; HCN, HCl, CO, H₂S, HF, NO₂ – датчик измерения HCN, HCl, CO, H₂S, HF, NO₂ соответственно; I – прихожая (4,02 м²); II – жилая комната (18,36 м²); III – кухня (9,98 м²); IV – ванная комната (4,10 м²); V – жилая комната (10,05 м²)

Figure 1 – Plan of the apartment with the points of control of the environmental parameters: 1-7 – measuring points; T – thermocouple; \mathcal{A} – smoke detector (optical density detector); CO – carbonmonoxide sensor; $T\Pi$ – experimental configuration; HCN, HCl, CO, H₂S, HF, NO₂ – sensors of HCN, HCl, CO, H₂S, HF, NO₂ respectively; I – hallway (4,02 m²); II – living room (18,36 m²); III – kitchen (9,98 m²); IV – bathroom (4,10 m²); V – living room (10,05 m²)

Материал для чехла выбирался с учетом применяемости его в качестве обивки при изготовлении мебели и способности поддерживать процесс тления/горения. Известно, что при воздействии тлеющей сигареты на материалы из искусственных волокон и шерсти воспламенения и распространения тления не происходит, образующаяся при этом корка нагара препятствует поддержанию процесса тления. Материалы, состоящие из волокон хлопка и льна, при тлении выделяют достаточное количество тепловой энергии для поддержания и как результат распространения тления по поверхности на значительное расстояние. При образовании достаточно большой концентрации газообразных горючих продуктов горения и их нагреве возможно самовоспламенение.

В качестве источников зажигания предлагается использовать тлеющую сигарету

(для тлеющего пожара) и газовую горелку (для пламенного пожара)². Сигарета, используемая в качестве малокалорийного источника зажигания, должна иметь следующие характеристики (без учета фильтра): длину (60 ± 5) мм; диаметр ($8,0 \pm$ 0,5) мм; массу ($1,0 \pm 0,1$) г. Время тления части сигареты длиной 50 мм должно составлять (12 ± 3) мин.

²Материалы текстильные. Постельные принадлежности. Мягкие элементы мебели. Шторы. Занавеси. Методы испытаний на воспламеняемость: ГОСТ Р 53294-2009. – Введ. 01.05.2009. – М. : Стандартинформ, 2009. – 18 с.

Furniture – Assessment of the ignitability of upholstered furniture – Part 1: Ignition source smouldering cigarette: EN 1021-1:2014. – Availability. 13.08.2014. – CEN/TC 207, 2014. – 22 p.

Furniture – Assessment of the ignitability of upholstered furniture – Part 2: Ignition source match flame equivalent: EN 1021-2:2014. – Availability. 13.08.2014. – CEN/TC 207, 2014. – 24 p.

Для определения времени тления делают метки на сигарете на расстоянии 5 и 55 мм от зажигаемого конца. Зажигают сигарету и пропускают через нее воздух до установления тления. На данную операцию следует использовать от 5 до 8 мм длины сигареты. Затем нанизывают сигарету на острие горизонтально расположенной проволоки на расстоянии 13 мм от незажженного конца. После достижения границей тления отметки 55 мм сигарета удаляется. Сигарета должна размещаться на макете таким образом, чтобы тлеющий конец сигареты находился на расстоянии не менее 100 мм от края образца, при этом сигарета должна располагаться в стыке пенополиуретановых пластин.

Пламенное горение пенополиуретановых пластин инициировалось при помощи газовой горелки, которая представляет собой трубку, изготовленную из нержавеющей стали с внутренним диаметром $(6,5 \pm 0,1)$ мм и длиной не менее 200 мм. Газовая горелка подсоединяется гибким шлангом через вентиль и устройство для измерения расхода газа к баллону с пропан-бутановой смесью. Длина гибкого шланга от 2,5 до 3,0 м. Расход газа составляет 44 см³/с. В таких условиях пламя горелки подобно пламени спички длиной около 4 см. Газовая горелка размещается на макете таким образом, чтобы трубка газовой горелки проходила горизонтально и соприкасалась с поверхностью образца без нажима. Пламя горелки должно находиться в стыке пенополиуретановых пластин на расстоянии не менее 100 мм от края образца. Время воздействия пламени газовой горелки на образец составляет (15 ± 1) с.

Исходя из возможных вариантов возникновения и развития пожара в жилом помещении, исследованы 12 сценариев развития пожара, называемых далее тестовыми пожарами (от ТП-1 до ТП-12). Тестовые пожары характеризуются местом расположения очага, типом горения горючего (пламенное или тление), особенностями естественной вентиляции (дверь открыта/закрыта), расположением средств измерения в помещениях. Средства измерения располагаются в различных местах (точках) помещения в зависимости от цели эксперимента (исследование динамики продуктов горения в горизонтальной и вертикальной плоскостях помещения, распространение продуктов горения в смежные помещения). Расположение средств измерений показано на рисунке 1. В таблице 1 приводятся данные, характеризующие тестовые пожары.

В точках с первой по четвертую средства измерения температуры, концентрации угарного газа и потока оптического излучения, рассеянного дымом устанавливаются у потолка на высоте (2,5-3,0) м и на высоте 0,5 м от пола, что соответствует положению пожарного извещателя и головы спящего человека (тестовые пожары ТП-1 и ТП-2). Расположение средств измерения вблизи двери, окна, середины комнаты и глухой стены позволяет получить распределение измеряемых параметров в горизонтальной плоскости на разных высотах. Вертикальное распределение температуры, концентрации угарного газа и потока оптического излучения, рассеянного дымом исследуется точках 1, 2, 4 и 5 при размещении средств измерений вблизи потолка и на высотах 2,0; 1,5 и 0,5 м (тестовые пожары ТП-3 и ТП-4). Распределение продуктов горения в смежные пространства (коридор, смежная комната) с учетом наличия сообщения между ними (двери открыты/закрыты) исследуются в тестовых пожарах от ТП-5 до ТП-12. В шестой и седьмой точках измеряется концентрация удушающих и раздражающих токсичных газов. На высоте 0,5 м (положение головы спящего человека) измеряется концентрация удушающего газа, а на высоте 1,5 м (положение головы человека, стоящего в полный рост) – концентрация раздражающего газа. Обусловлено это тем, что удушающий газ наиболее опасен для спящего человека, а раздражающий препятствует его безопасной эвакуации.

Оборудование и средства измерения

Для измерения температуры газовой среды и интенсивности рассеянного дымом оптического излучения применяются термодатчики С2000-ИП-03 и дымовые датчики ДИП-34А-04. Датчики входят в состав адресно-аналоговой измерительной системы, содержащей устройства С2000-КДЛ и АРМ «Орион Про», производства НПВ «Болид». Такие измерительные системы позволяют выполнять измерение температуры в градусах Цельсия и величины рассеянного дымом потока оптического излучения не реже одного раза в секунду.

Таблица1/Table 1

Тестовые пожары Experimental configurations

Тестовый пожар Experi- mental configura- tions	Тип горения топлива Scenario	Сжигаемое топливо Mock-up	Источник зажигания Ignition	Расположе- ние очага пожара Mock-up location	Вентиляция Ventilation (Doors)	Номера и высоты расположения точек контроля Numbers and heights of the control points locations
ТП1	Тлеющий Smoldering	Макет мебели 1 Mock-up 1	Сигарета Cigarette	Жилая	ДВ1 закрыта	№ 1–4,6
ТП2	Пламенной Flaming	Макет мебели 2 Mock-up 2	Газовая горелка Gas-light	комната Living room	Door 1 closed	h ₁₋₄ − 2,5* и 0,5 м h ₆ − 0,5 м
ТП3	Тлеющий Smoldering	Макет мебели 1 Mock-up 1	Сигарета Cigarette	_ Жилая комната Living room	ДВ1 закрыта Door 1 closed	№ 1, 4, 6 h _{1,4} – 2,5*; 2,0; 1,5 и 0,5 м h ₆ – 1,5 м
ТΠ4	Пламенной Flaming	Макет мебели 2 Mock-up 2	Газовая горелка Gas-light			
ТП5	Тлеющий Smoldering	Макет мебели 1 Mock-up 1	Сигарета Cigarette	_ Жилая комната Living room	ДВ1 закрыта Door 1 closed	№ 2, 5, 7 <i>h</i> _{2,5} – 2,5*; 2,0; 1,5 и 0,5 м <i>h</i> ₇ – 1,5 м
ТП6	Пламенной Flaming	Макет мебели 2 Mock-up 2	Газовая горелка Gas-light			
ТП7	Тлеющий Smoldering	Макет мебели 1 Mock-up 1	Сигарета Cigarette	_ Жилая комната Living room	ДВ1 открыта Door 1 open	№ 2, 5, 7 h _{2,5} - 2,5*; 2,0; 1,5 и 0,5 м h ₇ - 1,5 м
ТП8	Пламенной Flaming	Макет мебели 2 Mock-up 2	Газовая горелка Gas-light			
ТП9	Тлеющий Smoldering	Макет мебели 1 Mock-up 1	Сигарета Cigarette	_ Кухня Kitchen	ДВ1 и ДВ2 открыты Doors 1, 2 open	№ 2, 5, 6 h _{2,5} - 2,5*; 2,0; 1,5 и 0,5 м h ₆ - 0,5 м
ТП10	Пламенной Flaming	Макет мебели 2 Mock-up 2	Газовая горелка Gas-light			
ТП11	Тлеющий Smoldering	Хлеб Bread	Электро- плитка	Кухня Kitchen	ДВ1 и ДВ2 открыты Doors 1, 2 open	№ 2, 5, 6 $h_{2,5} - 2,5^*; 2,0;$
ТП12	Пламенной Flaming	Mасло Butter	Electric Stove			1,5 и 0,5 м h ₆ – 0,5 м

* точка размещения средств измерения приведена для помещения с высотой потолка 2,5 м.

* – control point location is stated for the accommodation with the height of 2,5 m.

Результаты измерения интенсивности рассеянного дымом оптического излучения даются в единицах с размерностью децибел деленный на метр (дБ/м*) и соответствуют удельной оптической плотности среды в измерительной камере наполненной дымом, образованным при горении древесины. Калибровка измерительной системы выполнялась производителем в стандартном испытательном дымовом канале. Дым, образующийся при тлении макета мебели, содержащего пенополиуретан с синтетической или хлопчатобумажной тканью, имеет не только другой цвет (черный), но и формируется в условиях, которые отличаются от лабораторных. Для установления соотношения между значениями удельной оптической плотности газовоздушной среды, содержащей дым, образующийся при горении пенополиуретана совместно с тканью и соответствующими показаниями адресно-аналоговой измерительной системы (калибровка адресно-аналоговой измерительной системы), использовалась установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития [11].

Размещение измерительной системы контроля температуры и оптических характеристик среды в помещении при калибровке показано на рисунке 2.





Рисунок 2 – Размещение измерительной системы контроля температуры и оптических характеристик среды при калибровке по вертикали (*a*) и горизонтали (*b*): 1–8 – точки размещения средств измерений; ТО1 – тестовый очаг

Figure 2 – Placement of a measuring system for monitoring the temperature and optical characteristics of environment during calibration horizontally (*a*) and vertically (*b*): 1-8 – measuring points; TO1 – mock-up

В ходе калибровки используемый тестовый пожар проходил три стадии: начальную, развитого пожара и затухание. В соответствии с этим оптическая плотность газовоздушной среды вначале нарастала, а после достижения максимального значения уменьшалась. Полученные соотношения между оптической плотностью среды и показаниями адресно-аналоговой измерительной системы с датчиком ДИП-34А-04, диаграммы калибровки, приведены на рисунках 3 и 4. Приведенные диаграммы калибровки показывают соотношение между показаниями измерительной системы в дБ/м* и удельной оптической плотностью газовоздушной среды, содержащей дым, образованный при горении пенополиуретана с тканью при увеличении плотности дыма и при его уменьшении в окружающей среде. Ширина полосы, в которой находятся измеренные значения³, инструментальную неопределенность, дает которая не превышает 0,15 дБ/м в диапазоне значений удельной оптической плотности от 0,05 дБ/м до 0,80 дБ/м в начале тестового пожара (первые 200 с пожара).

После выгорания горючего концентрация дыма постепенно уменьшалась и показания измерительной системы (рисунок 4) уменьшались от 2,5 дБ/м* до 0,10 дБ/м*, соответствуя значениям удельной оптической плотности от 0,35 дБ/м до 0,05 дБ/м в интервале времени от 1033 до 1303 с. Пламенное горение пожара наблюдалось до 600 с.

Из представленных результатов видно, что в начале пламенного горения тестового пожара для формирования максимального выходного сигнала требуется создание большего значения удельной оптической плотности среды (0,7 дБ/м), чем при его затухании (0,35 дБ/м). Сделанный вывод подтверждается результатами исследования динамики изменения рассеивающей способности дыма и удельной оптической плотности среды в измерительном канале при горении макета мягкой мебели, полученными авторами ранее (рисунок 5).

³Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения: РМГ29–2013. – Введ. 01.01.2015. – М. : ФГУП «Стандартниформ», 2014. – 56 с.



Рисунок 3 – Соотношение между оптической плотностью среды и показаниями адресно-аналоговой измерительной системы при нарастании оптической плотности среды

Figure 3 – Interdependence between transmission optical density of the environment and measurement system readings (when the optical density of the environment increases)





Figure 4 – Interdependence between transmission optical density of the environment and measurement system reading (when the optical density of environment decreases)

Из представленных на рисунке 5 результатов видно, что рассеивающая способность дыма при пламенном горении, например, на сотой секунде, меньше, чем после прекращения пламенного горения на 250 с; удельная оптическая плотность в первом и во втором случае составляла 1,2 дБ/м, а рассеянный поток оптического излучения соответственно равнялся 10 отн. ед. и более 12 отн. ед. Меньшая рассеивающая способность дыма при пламенном горении связана с образованием более мелких частиц при достаточном количестве кислорода и высокой температуре в области пламени.

Использованная для измерения температуры газовой среды измерительная система в составе С2000-КДЛ, АРМ «Орион Про» и адресно-аналоговых тепловых датчиков С2000-ИП позволяет измерять температуру в диапазоне от минус 30 до плюс 65 °C с точностью ±1,5 °C. На рисунке 6 приведены полученные при калибровке измерительной системы результаты измерения температуры в испытательной камере размерами 3 × 3 × 2,5 м при горении макета мягкой мебели. Замеры производились в 8 точках и сравнивались с показаниями термоэлектрических преобразователей, подключенных к измерителю-регулятору «Сосна-004». Точки 1–4 располагались под потолком по центру помещения. Точки 5–8 размещались по центру помещения на высотах 2,5; 1,5; 1 и 0,5 м (рисунок 2). Результаты измерения температуры в точках 1, 3, 4, 6 приведены на рисунке 6.



Рисунок 5 – Изменение во времени интенсивности рассеянного излучения (*a*) и удельной оптической плотности среды (*b*) при горении макета мягкой мебели в точке 1 (рисунок 2)

Figure 5 – The intensity of the radiation scattered (*a*) and the optical density (*b*) variations in time during burning of the furniture mock-up at point 1 (Figure 2)



Рисунок 6 – Изменение температуры во времени в помещении при пламенном горении макета мягкой мебели (точки 1, 3, 4, 6; рисунок 2)

Figure 6 – Temperature dynamic in the room with a burning upholstered furniture mock-up (points 1, 3, 4, 6; Figure 2)

Распределение концентрации угарного газа по вертикали и по горизонтали определяется в восьми точках с помощью анализатора угарного газа A-CO-8. Кроме того, в двух точках помещения с очагом пожара, а также в смежном пространстве измеряется концентрация комплекса токсичных веществ CO, HCl, HCN, HF, NO₂, H₂S, SO₂. Для этих целей используются газоанализаторы «АНКАТ-7664 Микро-26», *Testo* 320, *MSA Altair* 5X, OKA-T и *Multilyzer-NG*. Все газоанализаторы внесены в государственный реестр средств измерений и имеют аттестаты о поверке.

Принцип действия используемых газоанализаторов основывается на электрохимическом методе определений массовых концентраций токсичных веществ в газовоздушной среде. В качестве чувствительного элемента в газоанализаторах используется электрохимический сенсор (ячейка). Контролируемый газ через фильтр, выполняющий функцию селективного фильтра, и гидрофобную мембрану диффундирует на измерительный электрод, выполненный из одного из благородных металлов (платина, золото, палладий либо другого драгметалла). Высвобождающиеся при этом электроны проходят через электролит и эталонный электрод и формируют во внешней цепи сигнал постоянного тока. Величина этого сигнала прямо пропорциональна концентрации детектируемого газа.

Заключение

Предложена методика исследования параметров среды при пожаре в жилых помещениях и смежных с ними пространствах, позволяющая установить связь между характеристиками окружающей среды и опасными факторами пожара для определения величин, контроль которых позволит обеспечить условия для безопасной

эвакуации людей. Разработанная методика предусматривает определение основных продуктов сгорания (удушающих и раздражающих), образующихся при горении материалов, характерных для жилых помещений в местах, где их воздействие на человека представляет наибольшую опасность. Содержание в газовоздушной среде образующихся при пожаре раздражающих газов (HCl, HCN, HF, NO₂, H₂S, SO₂) предусматривается в точках пространства, определяющих положение органов дыхания человека, лежащего на кровати и стоящего в полный рост. Пространственное распределение наиболее опасного удушающего газа (угарного) исследуется как по вертикали, так и по горизонтали с помощью разработанной системы контроля угарного газа А-СО-8 с применением электрохимических датчиков, обладающих селективностью по отношению к угарному газу.

Предложенные в методике варианты макетов мебели и стандартизированных источников зажигания позволяют воспроизвести начальную стадию пожара, характерную для пожаров в жилье. Предложенная методика позволит изучать не только динамику изменения параметров окружающей среды в горизонтальной и вертикальной плоскостях в помещении, где произошел пожар, но и распределение продуктов горения в смежных пространствах.

Создана измерительная система на основе адресно-аналоговой системы пожарной сигнализации «Орион», производства НПВ «Болид», позволяющая получить распределение в пространстве (по горизонтали и по вертикали) свойства дыма рассеивать ИК излучение с оценкой соответствующего значения удельной оптической плотности газовоздушной среды и значения температуры окружающей среды до +65 °C с точностью ±1,5 °С. Измерения выполняются в среде с удельной оптической плотностью от 0,05 дБ/м. до 0,80 дБ/м, содержащей дым при пламенном горении пенополиуретана, а при его тлении удельная оптическая плотность может изменяться от 0,05 дБ/м до 0,35 дБ/м. Показано, что свойство дыма рассеивать ИК излучение зависит от условий его образования.

Полученные результаты позволят разработать методику испытаний пожарных извещателей, предназначенных для защиты жилых помещений и находящихся в них людей, сформулировать критерии эффективности функционирования (алгоритмы работы) извещателей, используемых для защиты жилых помещений.

Список использованных источников

1. Дробыш, Д.В. Проблемы эффективного применения автономных пожарных извещателей / Д.В. Дробыш, Д.Л. Есипович, А.А. Антошин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2010. – № 2(28). – С. 55–64.

2. National Fire Alarm Code. Handbook / Fourth edition. Edited by Lee F. Richardson, Wayne D. Moore, P.E., FSFPE. – National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2004. – 680 p.

3. *Bukowski, R.W.* Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings / R.W. Bukowski [et al.] // NIST Technical Note 1455-1. – 2008. – 265 p.

4. *Cleary, T.G.* Improving Smoke Alarm Performance – Justification for New Smoldering and Flaming Test Performance Criteria / T.G. Cleary // NIST Technical Note 1837. – 2014. – 27 p.

5. *Cleary, T.G.* Results from a Full-Scale Smoke Alarm Sensitivity Study / T.G. Cleary // Fire Technology. – 2014. – Vol. 50. – Is. 3. – P. 775–790. **DOI:** 10.1007/s10694-010-0152-2

6. Осяев, В.А. Динамика температуры в горящем и смежном помещениях и определение времени достижения ее опасного значения / В.А. Осяев. – Минск : КИИ МЧС Беларуси, 2015. – 114 с.

7. *Cleary, T.G.* A Test Methodology for Multiple Sensor – Multiple Criteria Alarms / T.G. Cleary // 13th International Conference on Automatic Fire Detection AUBE '04. – Germany : University of Duisburg, 2004.

8. *Пузач, С.В.* Оценка опасности акролеина, синильной и соляной кислоты при пожаре / С.В. Пузач [и др.] // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2009. – № 1(9). – С. 71–75.

9. *Пузач, С.В.* Роль динамики опасных факторов пожара в патогенезе отравления человека на пожаре / С.В. Пузач [и др.] // Вестник командно-инженерно-го института МЧС Республики Беларусь. – 2010. – № 1(11). – С. 4–10.

10. Свирщевский, С.Ф. Определение состава газовой фазы, образующейся при термическом разложении полимерных материалов / С.Ф. Свирщевский [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – № 8, т. 79. – С. 12–16.

11. Зуйков, И.Е. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития / И.Е. Зуйков // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики : сб. науч. тр. / под ред. Н.П. Мигуна. – Минск : Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2011. – С. 197–202.

References

1. Drobysh D.V., Esipovich D.L., Antoshyn A.A. [The problems of effective self-contained smoke detectors usage]. *Emergency situations: prevention and elimination*, 2010, no. 2(28), pp. 55–64 (in Russian).

2. National Fire Alarm Code. Handbook. Fourth edition. Edited by Lee F. Richardson, Wayne D. Moore, P.E., *FSFPE. National Fire Protection Association*, *Quincy, Massachusetts*, 2004, 680 p.

3. Bukowski R.W., Peacock R.D., Averill J.D., Cleary T.G., Bryner N.P., Walton W.D., Reneke P.A., Kuligowski E.D. Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings. *NIST Technical Note 1455-1*, 2008, 265 p.

4. Cleary T.G. Improving Smoke Alarm Performance – Justification for New Smoldering and Flaming Test Performance Criteria. *NIST Technical Note 1837*, 2014, 27 p.

5. Cleary T.G. Results from a Full-Scale Smoke Alarm Sensitivity Study. *Fire Technology*, 2014, vol. 50, is. 3, pp. 775–790. **DOI:** 10.1007/s10694-010-0152-2

6. Osyaev V.A. *Dinamika temperatury v gorya*shchem i smezhnom pomeshcheniyakh i opredelenie vremeni dostizheniya ee opasnogo znacheniya [Temperature dynamics in the burning and adjacent rooms and time determination for its dangerous level achievement]. Minsk, Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus, 2015, pp. 114 (in Russian). 7. Cleary T.G. A Test Methodology for Multiple Sensor – Multiple Criteria Alarms. *13th International Conference on Automatic Fire Detection AUBE '04*, Germany, University of Duisburg, 2004.

8. Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Smagin A.V., Palevoda I.I., Poloz D.A., Kuzmitsky V.A. [Hazard assessment of acrolein, prussic and hydrochloric acids during the fire]. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2009, no. 1 (9), pp. 71–75 (in Russian).

9. Puzach S.V., Smagin A.V., Lebedchenko O.S., Doan V.M., Palevoda I.I., Poloz D.A., Osyaev V.A., Kuzmitsky V.A. [Role of fire hazardous factors dynamics in intoxication pathogenesis of a person during fire]. *Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2010, no. 1 (11), pp. 4–10 (in Russian).

10. Svirshchevskii S.F., Sokolik G.A., Leinova S.L., Rubinchik S.Ya., Klevchenya D.I., Gulevich A.L. [Determination of gas phase composition formed upon thermal decomposition of polymer materials]. *Industrial laboratory*. *Diagnostics of materials*, 2013, no. 8, vol. 79, pp. 12–16 (in Russian).

11. Zuikov I.E. [Device for Modelling of Early Stages of Fire Development]. *Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrolya i tekhnicheskoi diagnostiki*, Minsk, Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus, 2011, pp. 197–202 (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ от 28.02.2014 г. № 3

 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. Объём 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 чётким. 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 – «а», «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 вверху 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. 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 taped 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.