

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Том 7

№ 3

Vol. 7

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 7

№ 3

2016

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

СЕКРЕТАРЬ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Кулешов Н.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Кучинский П.В., д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Малкин В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем Военной академии Республики Беларусь (г. Минск, Беларусь)

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, советник Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)

Серенков П.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Соломахо В.Л., д.т.н., профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Турцевич А.С., д.т.н., начальник управления Министерства промышленности Республики Беларусь (г. Минск, Беларусь)

Хатько В.В., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

Гринчук А.П., к.т.н., доцент, старший научный сотрудник Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

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)

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

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

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

Захаров И.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры метрологии и измерительной техники Харьковского Национального университета радиоэлектроники (г. Харьков, Украина)

Колтунович Т.Н., к.т.н., доцент, доцент Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

Кухаренко Н.А., генеральный директор ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (г. Минск, Беларусь)

Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)

Машко В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)

Муравьев В.В., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)

Це Ли, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

Чернявский А.Ф., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)

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: Самарина А.В., Костина Г.А., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 23.11.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 4,27. Тираж 300 экз.

Дата выхода в свет 09.12.2016. Заказ № 999.

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 7

№ 3

2016

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, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

SECRETARY

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

Vitaly A. Malkin, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Aviation Department, Belarusian Military Academy (Minsk, Belarus)*

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

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

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

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

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

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

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

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

INTERNATIONAL ADVISORY EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

Anatoly P. Grinchuk, *PhD (Engineering), Associate Professor, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

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)*

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

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

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

Igor P. Zakharov, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Metrology and Measurement Engineering Department, Kharkiv National University of Radioelectronics (Kharkiv, Ukraine)*

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

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

Nikolai A. Kuharenko, *General Director of Minsk Scientific and Research Instrumentation Engineering Institute (Minsk, Belarus)*

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

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

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

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

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

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

ADDRESS:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.</i> Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов. (Обзор).....	235
<i>Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Главный В.Г.</i> Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смещения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок.....	247
<i>Zhukouski A., Anshakou A., Biryła A., Chyrykala U., Kanavalau Y., Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.</i> Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation monitoring.....	256
<i>Гулис И.М., Купреев А.Г.</i> Спектральная фильтрация изображений посредством дисперсионных систем.....	262
<i>Реутская О.Г., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.</i> Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO, H₂, C₃H₈, CO₂.....	271
<i>Комаров Ф.Ф., Пилько В.В., Кулешов В.Н.</i> Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости».....	279

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Баев А.Р., Митьковец А.И., Костюк Д.А. Коновалов Г.Е.</i> Особенности обнаружения поверхностных несплошностей с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн.....	286
<i>Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.</i> Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты.....	296
<i>Paśko S., Sutkowski M.</i> Anthropometric measurement based on structure from motion imaging technique.....	305
<i>Адамчук Д.В., Ксенович В.К., Горбачук Н.И., Шиманский В.И.</i> Импедансная спектроскопия поликристаллических пленок диоксида олова.....	312

CONTENTS

Measuring instruments

<i>Gilavdary I., Riznookaya N.</i> Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)	235
<i>Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Glavny V.G.</i> Application features of spatial conductometry sensors in modelling of coolant flow mixing in nuclear power unit equipment	247
<i>Zhukouski A., Anshakou A., Biryła A., Chyrykala U., Kanavalau Y., Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.</i> Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation monitoring	256
<i>Gulis I.M., Kupreyeu A.G.</i> Spectral filtration of images by means of dispersive systems	262
<i>Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M.</i> Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂	271
<i>Komarov F.F., Pilko V.V., Kuleshov V.N.</i> Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method	279

Methods of measurements, monitoring, diagnostics

<i>Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Kononov G.E.</i> Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation	286
<i>Komar D., Lukashevich R., Guзов V., Kutsen S.</i> Neutron capture gamma ray field with energy to 10 MeV for metrological support of radiation protection devices	296
<i>Paśko S., Sutkowski M.</i> Anthropometric measurement based on structure from motion imaging technique	305
<i>Adamchuck D.V., Ksenevich V.K., Gorbachuk N.I., Shimanskij V.I.</i> Impedance spectroscopy of polycrystalline tin dioxide films	312

УДК 681.5.08

Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов. (Обзор)

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.

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

Поступила 09.10.2016

Принята к печати 16.11.2016

На основании анализа открытых литературных источников рассматриваются основные этапы создания гравитационных градиентометров для измерений неоднородности гравитационных полей с различных подвижных носителей, в том числе в условиях невесомости. Анализируется роль этих приборов в современной науке и технике. Описываются основные физические принципы, позволившие создать приборы, которые реально используются в настоящее время. Также описываются основные параметры этих приборов, характеризующие их качество.

Цель данного исследования состояла в том, чтобы установить основные проблемы, которые приходится решать при создании этих приборов и которые препятствуют их широкому внедрению в различные области науки и техники, сформулировать основные тенденции и состояние их разработки в настоящее время. Показывается, что существующие приборы являются слишком дорогими, тяжелыми и массивными, чтобы иметь возможность их широко применять как в условиях действия силы тяжести, так и в условиях невесомости. Описывается стремление разработчиков создавать более простые, надежные и малобюджетные приборы, в первую очередь предназначенные для использования на микроспутниках, созданию которых уделяется все большее внимание. Делается вывод, что разработки гравитационных градиентометров на основе технологий микромеханических электронных систем в настоящее время не могут преодолеть проблемы, связанные с уровнем шума, свойственные подобным приборам.

Данное исследование в некоторой степени является обоснованием для следующей работы авторов, в которой будут изложены новые принципы построения гравитационных градиентометров, которые, возможно, позволят решить некоторые из проблем, описанных ниже.

Ключевые слова: гравитационный градиентометр, физические принципы, гибридный градиентометр, внутренние шумы, микроспутники.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@mail.ru

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@mail.ru

Для цитирования:

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.
Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов. (Обзор).
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 235–246.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

For citation:

Gilavdary I., Riznookaya N.
[Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 235–246(in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)

Gilavdary I., Riznookaya N.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 09.10.2016

Accepted for publication 16.11.2016

Abstract

The main steps of creating the gravity gradiometers for the measurement of inhomogeneously of gravitational fields on different mobile carriers, including in conditions of space, are considered on the basis of the analysis of the open literature. The role of these devices in modern science and technology is described. There are the basic physical principles which allowed to create devices that are actually used at the moment. The basic parameters of these devices characterizing their quality are also described.

The aim of this study is to establish the basic problems that have to be solved to create these instruments, as well as obstacles to their widespread adoption in the various areas of science and technology and to formulate the basic tendencies and state of development at the moment. It is shown that the existing devices are too expensive, heavy and massive to be used widely on the Earth and in space. Here is described the desire of developers to create more simple, reliable and low-budget devices, which primarily intended for using in micro satellites is described here. It is concluded that the development of gravity gradiometer based on micro-mechanical and electromechanical technologies currently can not overcome the problems associated with noises inherent such instruments.

This study in some ways is the rationale for the following work of authors, which sets out the principles of the new gravity gradiometer, which may help to solve some of the problems are described here.

Keywords: gravity gradiometers, physical principles, hybrid gradiometers, internal noises, microsatellites.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@mail.ru

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@mail.ru

Для цитирования:

Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.
Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов. (Обзор).
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 235–246.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

For citation:

Gilavdary I., Riznookaya N.
[Stages of development and state of engineering of gravity gradiometers for moving objects. (Review)].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 235–246(in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-235-246

Принцип действия и области применения гравитационных градиентометров для подвижных объектов

Гравитационный градиентометр (ГГ) для подвижных объектов – уникальный прибор, разработка которого активно началась с конца 1950-х гг. и продолжается по настоящее время. Начало этой работы положило NASA, которое поставило задачу создания методов и устройств изучения гравитационного поля Земли на низкоорбитальных спутниках, а также гравитационных полей других небесных тел (см. [1–4], [5 и имеющиеся там литературные ссылки]). Подобные устройства незаменимы при исследованиях внутреннего строения Луны и планет, где измерения силы тяжести с борта орбитальных аппаратов в принципе невозможны.

В дальнейшем ГГ стали разрабатывать для измерений непосредственно на поверхности Земли с борта различных носителей, где действие силы тяжести оказывается определяющим при выборе конструкции прибора. В этом случае ГГ используют для измерений небольших локальных изменений гравитации, вызванных изменениями плотности или глубины залегающих масс. Полученная информация может быть использована для исследований природных ресурсов, геотермальных полей, обнаружения водоносных горизонтов, подземных туннелей и пустот, а также в системах инерциальной навигации подводных лодок [6, 7], кораблей, самолетов [8–15, 63–65, 67].

Существующие ГГ содержат подвижную массу (ПМ), удерживаемую внутри прибора в упругом подвесе. Принцип действия этих приборов состоит в измерении вращения ПМ относительно корпуса под действием моментов сил гравитации или ее смещения под действием сил гравитации.

Неоднородность гравитационного поля описывают компонентами тензора гравитационного потенциала (ТГП). Всего существуют 9 компонент ТГП. Если вектор гравитации представлен своими компонентами g_x, g_y, g_z , то компоненты ТГП будут представлены компонентами $\Gamma_{xx}, \Gamma_{yy}, \Gamma_{zz}, \Gamma_{xy}, \Gamma_{xz}, \Gamma_{yz}$, где, например, $\Gamma_{xy} = \partial g_x / \partial y$, и три последние компоненты симметричны по своим индексам [16]. В свободном пространстве сумма $\Gamma_{xx} + \Gamma_{yy} + \Gamma_{zz} = 0$, поэтому пять из этих девяти компонент независимы между собой. Γ_{zz} считают наиболее полезной компонентой и называют вертикальным градиентом [17], Γ_{xz} и Γ_{yz} считают

горизонтальными градиентами, Γ_{xy} и $(\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy})/2$ рассматривают как параметры кривизны эквипотенциальной поверхности [10]. Эти компоненты определяют размеры, форму, ориентацию, а также плотность и глубину залегания геологических структур [16–19]. В частности, компонента Γ_{zz} определяет изопахиты (*isopach* – линия одинаковой мощности пласта) и позволяет найти плотность породы; остальные компоненты определяют контуры залегания пласта [18].

Первый ГГ изобрел венгр Р. Этвеш в 1896 г. [10, 20–22]. В простейшем виде ГГ Этвеша, называемый вариометром, представлял собой коромысло в форме гантели, подвешенное в горизонтальном положении на вертикальной тонкой упругой нити (торсионе) длиной около 30 см и диаметром 0,02 мм. Модели вариометра представлены на рисунках 1 и 2.

Проекция на ось торсиона момента силы M_z , обусловленной неоднородностью гравитационного поля и действующей на ПМ, определяется формулой:

$$M_z = (I_y - I_x) \left[\frac{1}{2} (\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx}) \sin 2(\varphi - \varphi_0) + \Gamma_{xy} \cos 2(\varphi - \varphi_0) \right], \quad (1)$$

где φ_0 – начальный угол ориентации ПМ в плоскости вращения; φ – угол поворота ПМ под действием M_z ; I_x и I_y – главные моменты инерции ПМ.

В случае тонкой плоской пластины имеем:

$$\frac{I_x - I_y}{I_z} = 1 - 2 \frac{h^2}{l^2 + h^2} \approx 1 - 2 \left(\frac{h}{l} \right)^2. \quad (2)$$

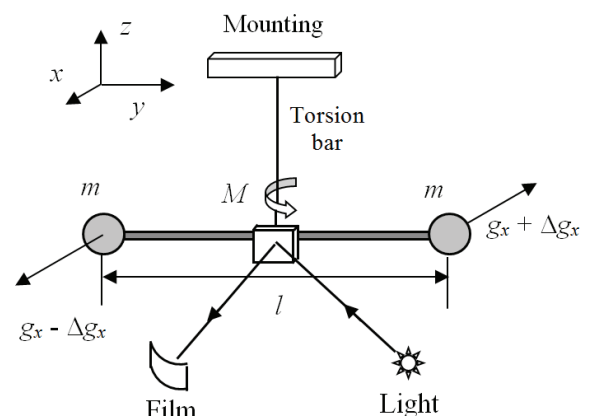


Рисунок 1 – Модель вариометра Этвеша с подвижной массой в форме гантели

Figure 1 – Model of the Eötvös's variometer with a proof mass in the form of a dumbbell

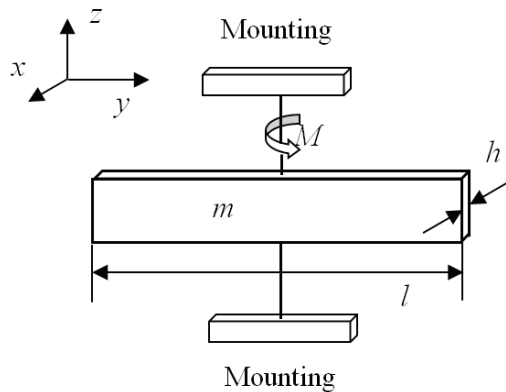


Рисунок 2 – Модель вариометра Этвеша с подвижной массой в форме пластины

Figure 2 – Model of the Eötvös's variometer with a proof mass in the form of a plate

Если ввести параметр $G = (I_x - I_y)/I_z$ который можно назвать «гантельность», при $h \ll l$ из формулы (2) имеем $G \approx 1$. Отсюда получают соотношение, характерное для ГГ, а именно:

$$I_x - I_y = GI_z \approx I_z. \quad (3)$$

Из формулы (1) видно, что, измерив разность углов $\varphi - \varphi_0$ при нескольких значениях угла φ_0 , можно найти разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} . При непрерывном вращении корпуса вариометра с угловой скоростью ω , когда $\varphi = \omega t$, из формул (1) и (3) получим:

$$M_z(t) \approx I_z \left[\frac{1}{2} (\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx}) \sin 2\omega t + \Gamma_{xy} \cos 2\omega t \right]. \quad (4)$$

В этом случае разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} можно измерить, разделив соответствующие фазы сигнала $M_z(t)$.

В качестве единицы значения компоненты ТГП используют величину «Этвеш»: $1 \text{ Ео} = 10^{-9} \text{ с}^{-2}$. Погрешность ГГ Этвеша составляет, примерно, 1 Ео. При этом каждое измерение требует не менее 20 мин вследствие длительного успокоения крутильных колебаний гантели [20, 22–24], и измерения должны проводиться в комфортных условиях при практически полном отсутствии вибраций основания [6]. Этот прибор обладает уникальной чувствительностью, и его модификации до сих пор используют в различных тонких физических экспериментах [10, 21, 24–26]. Однако он не может работать на подвижном основании.

Единица неоднородности гравитационного поля 1 Ео чрезвычайно мала. При неоднородно-

сти гравитационного поля, равной 1 Ео, величина g изменяется на одну миллионную часть на расстоянии 10 км. Силы или моменты сил, связанные с неоднородностью гравитационного поля, очень малы. Поэтому ГГ должны иметь высокую чувствительность. Среди гравитационных приборов, разработанных для измерений в условиях действия силы тяжести, наибольшей чувствительностью обладают приборы, имеющие торсионные подвесы. Это касается и угловых, и линейных акселерометров с упругими подвесами.

Основные проблемы создания гравитационных градиентометров на подвижном основании и принципы их решения

Основной проблемой, которую приходится решать при разработке ГГ, является разделение сил инерции и сил гравитации. ГГ могут быть построены по схеме разнесенных линейных акселерометров или по схеме углового акселерометра [27]. В схемах ГГ с линейными акселерометрами частично эту проблему удастся решить путем вращения корпуса прибора (1/4 Гц), что позволяет разделить силы гравитации и инерции по частоте [1, 2, 5, 8, 10, 27]. В этом случае влияние поступательных ускорений, перпендикулярных оси вращения, устраняют за счет суммирования сигналов идентичных акселерометров, установленных диаметрально противоположно на вращающемся диске. Для устранения влияния угловых ускорений диска устанавливают вторую пару таких же акселерометров, так что обе пары образуют крест, и вычитают друг из друга сигналы обеих пар [1]. Кроме того, вращение корпуса ГГ позволяет перенести частоту полезного сигнала в ту область, где тепловые шумы становятся меньше полезного сигнала. История ротационных ГГ начинается примерно с 1963 г. [8, 1 и имеющиеся там ссылки на литературу].

Второй проблемой, возникающей при создании ГГ, является разработка системы съема информации о перемещениях ПМ под действием полезного сигнала. В ГГ, работающих при комнатных температурах, обычно используют емкостные датчики с внешним возбуждением, обеспечивающие высокую чувствительность при минимальных размерах и энергопотреблении [6, 28]. Здесь выходным сигналом является электрическое напряжение. Как было показано

выше, ГГ с одной осью вращения измеряет разность компонент $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ и компоненту Γ_{xy} . Для непосредственного измерения всех компонент ТГП прибор должен содержать три одноосных блока, оси вращения которых взаимно перпендикулярны. В корпорации *Lockheed Martin* разработаны действующие ротационные ГГ: трехосный прибор *FTG* (или *Air-FTG*, если он предназначен для измерений на самолете) и одноосный прибор *AGG* (который также предназначен для измерений на самолете). Работа трехосного прибора *FTG* иллюстрируется на рисунке 3 [8, 61, 62]. Здесь на вращающихся дисках показаны по две пары линейных акселерометров. Выходные сигналы в каждом из диаметрально противоположных акселерометров складывают, и затем эти суммарные сигналы вычитают. Например, для диска с осью вращения вокруг вертикальной оси z в обозначениях рисунка имеем:

$$a_1 + a_2 - (a_3 + a_4) = -D(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})\sin(2\Omega t) + 2D\Gamma_{xy}\cos(2\Omega t). \quad (5)$$

Для диска с осью вращения вокруг горизонтальной оси x имеем:

$$a_1 + a_2 - (a_3 + a_4) = -D(\Gamma_{yy} - \Gamma_{zz})\sin(2\Omega t) - 2D\Gamma_{yz}\cos(2\Omega t). \quad (6)$$

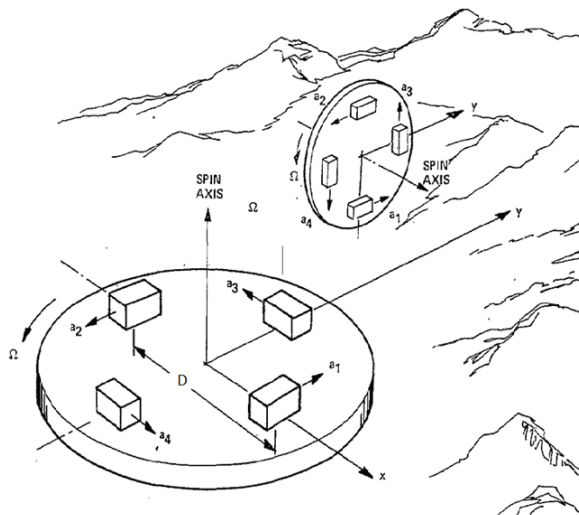


Рисунок 3 – Расстановка линейных акселерометров на вращающемся диске в приборе *FTG* [8, 61, 62]

Figure 3 – Positioning of the linear accelerometers on the rotating disc in *FTG* instrument [8, 61, 62]

На рисунке 4 показана сборка всех трех дисков в карданном подвесе прибора *Air-FTG* [29].



Рисунок 4 – Сборка всех трех дисков в кардановом подвесе прибора *Air-FTG* [29, 61]

Figure 4 – Assembling of all three discs of *Air-FTG* in gimbal [29, 61]

На рисунке 5 показан прибор *Air-FTG* в сборке [78].

В целом эти приборы являются дорогими и сложными. Один экземпляр *FTG* стоил \$ 5 млн, на его изготовление уходило от одного до полутора лет [7]. Весь проект разработки прибора *FTG* «поглотил» более \$ 400 млн [29, 30]. В приборе *FTG* диаметр вращающегося диска равен 15 см, в приборе *AGG* этот диаметр вдвое больше [10], и на этом диске установлены четыре дополнительных акселерометра, что позволило повысить чувствительность прибора.

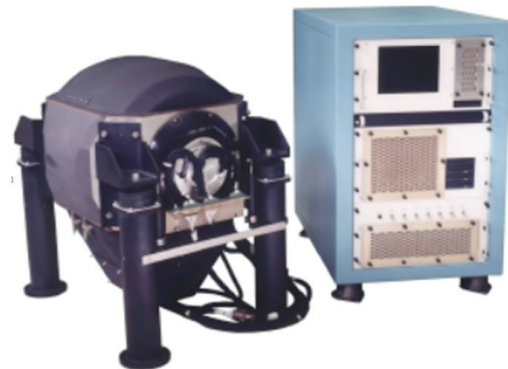


Рисунок 5 – Прибор *Air-GTG* на амортизаторах и с блоком электроники [78]

Figure 5 – *Air-GTG* device is on the shock absorbers and his electronic unit [78]

FTG непосредственно измеряет все компоненты ТГП, в том числе и компоненту Γ_{zz} . Для *AGG* значение Γ_{zz} оценивают теоретически методом эквивалентных источников [17]. В этом случае считают, что погрешность в оценке компоненты Γ_{zz} примерно вдвое превосходит погрешности измеряемых горизонтальных компонент

[17]. При коммерческом использовании в качестве подвижного носителя ГГ обычно используют самолет, летящий со скоростью 55–65 м/с на высоте 80 м [10, 17, 31]. Также проводились испытания *AGG* на вертолете при скорости 30 м/с на высоте 25–60 м и на аэростате при скорости 16 м/с и высоте 80 м [10].

Шумы и пространственное разрешение действующих гравитационных градиентометров

Важнейшими характеристиками мобильных ГГ являются среднеквадратичное значение шума N_{RMS} , пространственная длина волны $\lambda_c/2$ [10, 17]. Чем меньше значение λ_c тем более тонкие геологические структуры могут быть обнаружены [32]. Достижение малых значений этих величин, помимо инструментальных решений, в значительной степени обеспечивается апостериорной обработкой сигналов ГГ, их частотной и пространственной фильтрацией. Первая величина определяется АЧХ прибора и интервалом частот, в котором проводится измерение. Вторая величина определяется по имеющимся наземным гравитационным данным, подвергнутых гармоническому анализу [32]. Значение λ_c можно оценить следующим образом: при скорости 55 м/с и частоте среза НЧ фильтра 0,18 Гц (это типичное значение, используемое при обработке результатов), имеем $\lambda_c = 55/0,18 \approx 300$ м, тогда стандартное разрешение ГГ $\lambda_c/2 \approx 150$ м [17]. Величины N_{RMS} и λ_c не являются независимыми, но связаны между собой соотношением $N_{RMS} \sqrt{\lambda_c} = C$ [17]. Здесь константу C выражают в единицах [Ео·км^{1/2}] и называют плотностью амплитудного шума [17]. Это интегральный показатель, который позволяет сравнивать качество ГГ. Из приведенного равенства видно,

что попытка улучшить пространственное разрешение прибора за счет уменьшения λ_c неизбежно приведет к увеличению шумовой составляющей.

В литературе отмечается, что алгоритмы обработки сигналов мобильных ГГ постоянно совершенствуются, благодаря чему заявляемая погрешность мобильных ГГ из года в год уменьшается [10, 17, 33]. Поэтому приводимые в литературе данные о погрешностях приборов трудно сравнивать, как для каждого прибора в отдельности, так и при сравнении приборов между собой. В [10] и [17] для *AGG* приведено среднеквадратичное значение шума при измерении вертикальной компоненты при $\lambda_c = 300$ м, равное 7,6 и 4,6 Ео, соответственно. В свою очередь, в [32] и [34] приведено, что в *FTG* «пороговое значение» этой же компоненты для объектов с размерами до 300 м находилось в интервале от 2 Ео до 3 Ео или от 3 до 4 Ео, соответственно. В [35] приведен подробный анализ шумов *AGG* и *FTG*, где «сравнение выполнялось целиком на публикациях действующих операторов».

Дополнительно к сказанному о ротационных ГГ отметим, что в [36] сообщалось, что корпорации *Lockheed Martin* и *Neos* совместно разработали новую модификацию ГГ – прибор «*FTG* плюс», «чувствительность которого в 20 раз и пропускная способность в 10 раз превосходят существующий ГГ». Сведения о конструкции этого ГГ приведены не были. Возможно, этот прибор не является ротационным.

Европейским космическим агентством (*ESA*) в рамках программы *GOCE* для глобальных исследований гравитационного поля Земли в условиях невесомости разработан уникальный по чувствительности и точности электростатический ГГ (ЭГГ) [37, 73]. На рисунке 6 показана внутренняя компоновка спутника *GOCE* [77].

На рисунках 7 и 8 показаны соответственно ЭГГ и несущий его спутник.

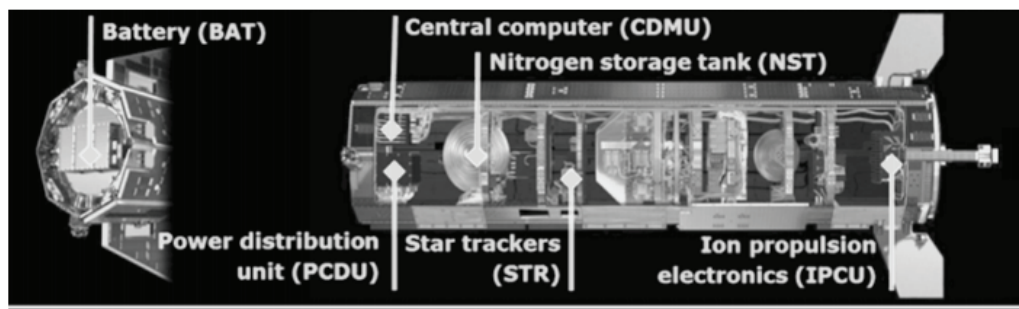


Рисунок 6 – Внутренность спутника *GOCE*, несущего ЭГГ (ЭГГ находится в центре) [77]

Figure 6 – The interior of the *GOCE* spacecraft, carrying the Electrostatic Gravity Gradiometer (EGG) (EGG is in the center) [77]

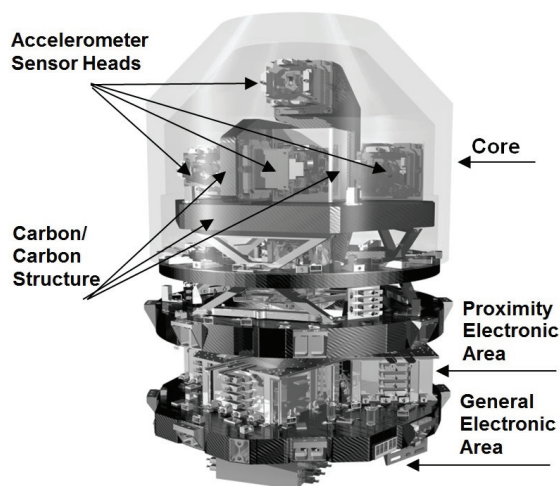


Рисунок 7 – Электростатический ГГ [43, 73]

Figure 7 – Electrostatic Gravity Gradiometer (EGG) [43, 73].

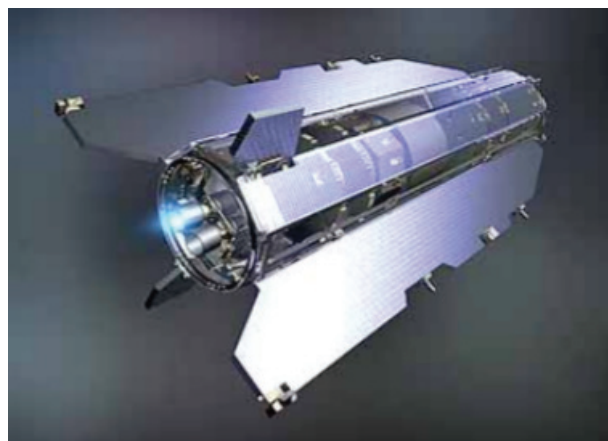


Рисунок 8 – Спутник, несущий ЭГГ [38]

Figure 8 – Spacecraft carrying the EGG [38]

Цель программы *GOCE* заключалась в том, чтобы при дискретности около 100 км достигнуть погрешности измерений аномалий гравитации 1 мГал и формы земного геоида 2 см. ЭГГ был вмонтирован в космический аппарат, запущенный на низкую (около 260 км) околоземную орбиту 17 марта 2009 г. Он успешно проработал до 10 ноября 2013 г. Длина аппарата составляла около 5,3 м, диаметр – около 1 м. Вес всей конструкции был около 1100 кг [38, 39].

ЭГГ содержит три пары неподвижных линейных акселерометров, разработанных фирмой *ONERA* [37], расположенных попарно по осям ортогональной системы координат. В акселерометрах каждая ПМ находилась в состоянии невесомости и удерживалась вблизи заданного положения электростатическим полем с помощью цепей следящих обратных связей. Перемещения

ПМ под действием внешних сил измерялись емкостными датчиками. Работа этого ГГ требовала контроля движения всего аппарата системой *GSM* и системами слежения с Земли. Равномерное движение и отсутствие вращения аппарата обеспечивалось с помощью корректирующих ионных двигателей [39, 40]. Время измерения полезного сигнала была около 10 с, что с учетом скорости спутника обеспечивало дискретность измерений 80–100 км [38, 39, 41].

В ЭГГ емкостные датчики смещения ПМ были построены на основе резонансных емкостных мостовых схем, питавшихся от внешних генераторов на частоте 100 кГц [42, 43, 68, 69]. При ожидаемой чувствительности $2 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ акселерометры показали рекордную для настоящего времени чувствительность порядка $(3,1\text{--}6,7) \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ в интервале частот от 0,004 до 0,1 Гц. В этом интервале частот шумы ЭГГ не превышали 24 мЕо/Гц^{1/2} [37, 44]. Отметим, что вся миссия *GOCE* стоила около € 350 млн [39, 45].

Вследствие неидеальности подшипников и различного рода небалансов, принудительная ротация корпуса ГГ увеличивает шумы на входе ротационных ГГ и уменьшает их чувствительность [46, 70]. Продольные и поперечные вибрации основания также приводят к возбуждению сигналов, не отличимых от полезного сигнала (псевдоградиентов) [10, 47]. Поэтому в самых последних разработках ГГ ротацию корпуса стараются исключить. В условиях действия силы тяжести это удастся сделать в схемах ГГ с угловыми акселерометрами. Здесь ПМ имеет форму, близкую к форме сбалансированной гантели. В таких ГГ влияние поступательных ускорений сводится к минимуму. Тепловые шумы здесь подавляют путем помещения угловых акселерометров в сосуд с жидким гелием (с температурой около 4 К). Такая «холодная» технология позволила увеличить чувствительность и пространственное разрешение ГГ. Однако использование жидкого гелия создает свои дополнительные проблемы и не позволяет уменьшить вес и размеры прибора [10]. «Холодные» ГГ разработали канадская фирма *GEDEX*, Университет Западной Австралии (*UWA*) и университет Мериленд при поддержке рудодобывающей корпорации *Rio Tinto Exploration* и алмазодобывающей корпорации *De Beers*. В этом приборе датчики смещения (поворота ПМ) построены по технологии СКВИД. «Холодные» ГГ могут работать на подвижных основаниях только при

условии их изоляции от вибраций основания с помощью уникальных стабилизированных платформ [26]. Характерное отличие «холодных» ГГ от «теплых» ГГ заключается в том, что в первом случае измерение смещения ПМ связывается с измерением тока, в то время как во втором – с измерением напряжения [26].

Цель разработок «холодных» ГГ состояла в достижении погрешности 1 Ео при времени измерения 1 с , что в условиях полета на самолете позволяло проводить измерения через каждые 60 м [48]. В проекте *GEDEX* градиентометр получил название *HD-AGG (High Definition AGG)*. В проекте *UWA* – название *VK1* [31, 49]. Разработка и испытания этого прибора до 2002 г. описаны в [67]. Проектные шумы этих ГГ составляли $1 \text{ Ео/Гц}^{1/2}$ в интервале частот от $0,001$ до 1 Гц [9, 16]. Считается, что с такими ГГ можно «охотиться» за узкими кимберлитовыми трубками, которыми богата Канада и которые содержат алмазы высокого качества [46]. В *GEDEX* также считают, что их ГГ позволяют заглянуть внутрь Земли на глубину до $12\text{--}15 \text{ км}$ [46, 48]. Разработка проекта *HD-AGG* стоила *GEDEX* более $\$ 88 \text{ млн}$ [48].

На рисунке 9 показан макет прибора *HD-AGG*, вмонтированный в кабину самолета вместе с изолирующей платформой [9]. На рисунке 10 показан макет прибора *VK1*, также вмонтированный в кабину самолета вместе с изолирующей платформой [49].

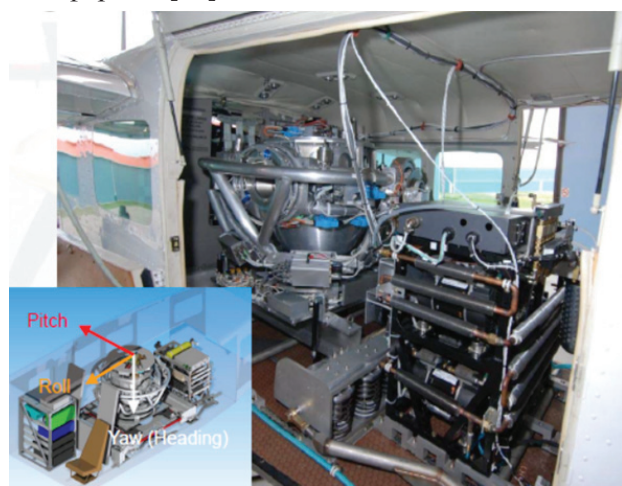


Рисунок 9 – Макет прибора *HD-AGG*, установленный в самолете. В левом нижнем углу показан этот прибор вместе с изолирующей платформой [9]

Figure 9 – The *HD-AGG* model is installed in the aircraft. The device is shown with an insulating platform in the left corner lower [9]



Рисунок 10 – Сосуд Дьюара с жидким гелием и прибором *VK1* установлен на стабилизированной платформе, которая вмонтирована в кабину самолета *Cessna 208* [49]

Figure 10 – The Dewar vessel with liquid helium and with *VK1* device is mounted on a stabilized platform, which is built into the cockpit of the *Cessna 208* [49]

«Теплые» ГГ, построенные на основе линейных акселерометров, и «холодные» ГГ, построенные на основе угловых акселерометров, обладают одним общим недостатком: все они тяжелые и громоздкие. Кроме того, ГГ с линейными акселерометрами имеют специфический недостаток: они содержат от шести (*GOCE*) до двенадцати (*FTG*) акселерометров, у которых масштабные коэффициенты и их нелинейности должны подгоняться под значения этих параметров одного из акселерометров. Положение акселерометров и направление их осей чувствительности также должны контролироваться. В частности, в ГГ *GOCE* в каждом из акселерометров должны контролироваться 12 параметров. Работа всей электростатической системы обеспечивается 36 цепями обратных связей [42], шумы которых воздействуют на ПМ акселерометров и ограничивают чувствительность ЭГГ [43].

Проблемы создания малогабаритных и дешевых гравитационных градиентометров

В настоящее время в связи с появлением микро- и наноспутников возникла потребность в разработке ГГ, малогабаритных, более простых и более дешевых, предназначенных для исследования гравитационных полей планет и астероидов [50, 71, 75, 76]. В той же *GEDEX* разрабатывают-

ся не криогенные ГГ, способные работать в космосе [51, 52].

Разработка малогабаритных и недорогих ГГ, в первую очередь, связывалась с появлением технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) [50, 72]. На рисунке 11 показаны два из возможных вариантов конструкции такого монолитного ГГ с зазорами переменной толщины, позволяющими их использовать в качестве дифференциального конденсатора [27].

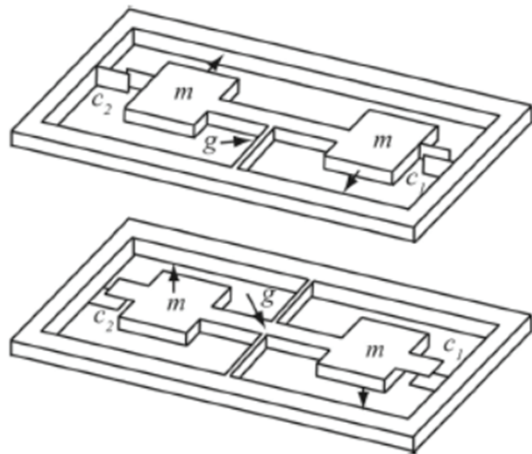


Рисунок 11 – Два из возможных вариантов конструкции монолитного МЭМ ГГ [79]

Figure 11 – Two possible construction options of a monolithic MEM GG [79]

Однако на этом пути возникла своя проблема. Известно, что по мере уменьшения размеров прибора имеет место возрастание дрейфа нуля [53]. Также именно в микро-ГГ отношение шум/сигнал растет, если масса и размеры ПМ уменьшаются [54–56]. В частности, известно, что при уменьшении размеров токопроводящих элементов растет и $1/f$ – шум [74]. Кроме того, более тесная компоновка элементов в микроприборах должна приводить к увеличению взаимного влияния его элементов. В частности, должна возрасти роль паразитных емкостей. Действительно, в этих приборах должны использоваться емкостные датчики смещения ПМ. Однако в известных схемах эти датчики действуют совместно с радиочастотными генераторами, обеспечивающими их работу. При наличии паразитных емкостей сигналы этих датчиков проникают в выходные цепи и усиливают шумы приборов, ограничивая их чувствительность [57, 58].

Также эти переменные сигналы могут выпрямляться в нелинейных электрических элементах выходных цепей, после чего их уже

нельзя будет отличить от полезных сигналов. По-видимому, по этим причинам в печати отсутствует информация о натурных испытаниях микроградиентометров, построенных на основе интегральных технологий.

В настоящее время сложилось мнение, что преодолеть шумовой порог можно в ГГ, у которых ПМ имеет по возможности большие размеры. Поэтому разработчики обратили внимание на гибридные конструкции, в которых отдельная ПМ крепится к кремниевой основе с интегрированной системой съема информации [59]. В этом случае ПМ может иметь массу от 100 до 200 грамм. В целом для измерений в околоземном пространстве такой «гибрид» должен иметь массу 1 кг, объем 1 дм³ и чувствительность 0.001 Ео/Гц^{1/2}. В таких ГГ рабочая частота может быть ниже 0.04 Гц, и резонансная частота может быть 1 Гц, чтобы обеспечить время измерения 1 с [50, 60]. Считается, что для целей «планетологии» достаточно иметь ГГ с чувствительностью 1 Ео/Гц^{1/2} [66].

Заключение

Существующие реально действующие гравитационные градиентометры очень сложны и дороги. Это уникальные приборы, впитавшие в себя практически все достижения конструкторской мысли и технологий. В частности, в приборе *FTG* линейные акселерометры должны работать в диапазоне нагрузок до 6 порядков в условиях, когда отношение шум/сигнал может достигать 11 порядков. Операторы, работающие с этими приборами, считают, что все они – и «теплые», и «холодные» – слишком тяжелые и объемные.

Потребность создания компактных, дешевых и надежных гравитационных градиентометров с указанными выше параметрами обсуждается достаточно давно. Однако сведения об удачных попытках реализации таких гравитационных градиентометров в известной авторам литературе отсутствуют. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время имеется некий «застой» в разработке подобных приборов. Разработчики микроэлектромеханических гравитационных градиентометров затрачивают много усилий в стремлении разработать подвесы подвижной массы, удовлетворяющие противоречивым требованиям: подвес должен быть максимально тонким, чтобы обеспечить высокую чувствительность прибора, и он же должен быть до-

статочны прочным и надежным, чтобы работать в условиях действия силы тяжести или чтобы выдержать испытания на Земле, если речь идет о гравитационных градиентометрах, работающих в невесомости. По-видимому, это противоречие до сих пор решить не удалось, и здесь требуются нетрадиционные решения. Кроме того, здесь требуются решения, позволяющие достигнуть приемлемого отношения шум/сигнал.

Некоторые из таких возможных таких решений будут предложены в следующей статье авторов.

References

1. Forward, R.L. Review of artificial satellite gravity gradiometer techniques for geodesy. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics*, 1974, vol. 1, pp. 157–192.
2. Forward R.L., Lemmen R.M., Lowe R.W., Peterson R.W., Tonai I., Williams W.E. Rotating gravity gradiometer study. *Hughes research laboratories*. Malibu, 1976, p. 174.
3. Paik H.J., Leung J.S., Morgan S.H., Parker J. Global gravity survey by an orbiting gravity gradiometer. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1988, vol. 69, no. 48, pp. 1601–1611.
4. Forward R.L., Bell C.C., Lahue P.M., Mallove E.F., Rouse D.W. Development of a rotating gravity gradiometer for earth orbit applications (AAFE). Available at: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730023608.pdf> (accessed 19.12.2015).
5. Forward R., Bell C., Morris J. Rotating gravitational sensors. Available at: http://www.gravityresearchfoundation.org/pdf/awarded/1965/forward_bell_morris.pdf (accessed: 19.12.2015).
6. Bell R.E. Gravity Gradiometry. *Scientific American*, 1998, pp. 74–79.
7. Beachy D. Bell Geospace Inc. takes a high-tech look at mining, oil and gas sites. *Houston Business Journal. News. Measuring up*, Jan 2, 2005.
8. Metzger E.H. Development Experience of a Moving Base Gravity Gradiometer and Discussion of Future Applications. *Proceedings of 14th Annual Gravity Gradiometry Conference*, Colorado Springs, 1986, 392 p.
9. Carroll K.A. Detectability of Natural Resource Structures by a Low-Noise Airborne Gravity Gradiometer System. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2009, vol. 1, pp. 8.
10. Dransfield M. Airborne gravity gradiometry in the search for mineral deposits. *Proceedings of exploration*, 2007, vol. 7, pp. 341–354.
11. Araya A., Kanazawa T., Shinohara M., Yamada T., Fujimoto H., Iizasa K., Ishihara T. A gravity gradiometer to search for submarine ore deposits. *Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011*

Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC), 2011, pp. 1–3.

12. Gravity Gradiometry. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/products/gravity-gradiometry.html> (accessed: 19.12.2015).

13. Welker T.C., Pachter M., Huffman R.E. Gravity gradiometer integrated inertial navigation. *Control Conference*, 2013, pp. 846–851.

14. Using Gravity to Detect Underground Threats. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/us/mst/features/2010/100714-using-gravity-to-detect-underground-threats-.html> (accessed: 19.12.2015).

15. Lockheed martin gravity systems. Cutting-Edge Resource and Exploration Technologies. Available at: <http://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/ms2/documents/LM-Gravity-Systems-brochure.pdf> (accessed: 19.12.2015).

16. Annecchione M., Moody M., Carroll K., Dickson D., Main B. Benefits of a high performance airborne gravity gradiometer for resource exploration. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, 2007, pp. 889–893.

17. Christensen A.N., Dransfield M.H., Van Galder C. Noise and repeatability of airborne gravity gradiometry. *First break*, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 55–63.

18. Murphy C.A. Exploring prospects with FTG Gravity. *9-th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics. Hyderabad*, 2012, p. 141.

19. Mataragio J. Exploring for Gold and Geothermal Systems in the Great Basin Using Full Tensor Gravity Gradiometry. *GRC Transactions*, 2012, vol. 36, pp. 1009–1012.

20. Süss F. The small original Eötvös – torsion balance. Budapest, 1928, 13 p.

21. Miller A.H. The Theory and Operation of the Eötvös Torsion Balance with Plates I, II, III. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 1934, vol. 28, pp. 1–31.

22. Bell R.E., Hansen R.O. The rise and fall of early oil field technology: The torsion balance gradiometer. *The Leading Edge*, 1998, vol. 17, no. 1, pp. 81–83.

23. Fischbach E. Geophysical Tests for Intermediate-Range Forces. Purdue univ lafayette in, 1993.

24. Adelberger E.G., Gundlach J.H., Heckel B.R., Hoedl S., Schlamminger S. Torsion balance experiments: A low-energy frontier of particle physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2009, vol. 62, no. 1, pp. 102–134.

25. Tomarken S. Gravitational Torsion Balance. Available at: <http://www.hep.vanderbilt.edu/~johnswe/classes/225a/cavmain.pdf> (accessed 19.10.2016).

doi: org/10.1063/1.4944709

26. Steiner G. Gravitational torsion balance. Houston, 1925, 17 p.

27. Liu H., Pike W.T., Dou G. A seesaw-lever force-balancing suspension design for space and terrestrial gravity-gradient sensing. *Journal of Applied Physics*, vol.

119, no 12, p. 124508. doi: org/10.1063/1.4944709

28. Van Essen M.C. Capacitive MEMS-based sensors: Thermo-mechanical stability and charge trapping. Enschede, University of Twente, 2009, 229 p.

29. Rogers M. An Investigation into the Feasibility of using a Modern Gravity Gradient Instrument for Passive Aircraft Navigation and Terrain Avoidance. Air Force Institute of Technology, Ohio, 2009, 165 p.

30. Strelan A. Going deep: a system concept for detecting deeply buried facilities from space. Air War College, 2003, 64 p.

31. Grujic M. Data processing requirements for an 1 Eo/ $\sqrt{\text{Hz}}$ AGG system. *22nd International Geophysical Conference and Exhibition*. Brisbane, 2012, pp. 1–4.

32. Murphy C.A., Brewster J., Robinson J. Evaluating Air-FTG survey data: bringing value to the full picture. *Preview*, 2007, vol. 126, pp. 24–28.

33. Dransfield M. Advances in airborne gravity gradiometry at Fugro Airborne Surveys. *EGM 2010 International Workshop Adding new value to Electromagnetic Gravity and Magnetic Methods for Exploration*. Capri, 2010, 5 p.

34. Murphy C.A. Exploring prospects with FTG. *9 Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics*, Hederabat, 2012, p. 141.

35. Dransfield M.H., Christensen A.N. Performance of airborne gravity gradiometers. *The Leading Edge*, 2013, vol. 32, no. 8, pp. 908–922.

doi: org/10.1190/tle32080908.1

36. NEOS and Lockheed Martin to Develop ‘New Generation’ Sensor. *NEOS press release*, July 6, 2016. Available at: http://www.neosgeo.com/wp-content/uploads/2016/08/NEOS_Release_FTG-Plus-Sensor_160706.pdf (accessed 19.10.2016).

37. Christophe B., Marque J-P., Foulon B. Accelerometers for the ESA GOCE mission: one year of in-orbit results. *GPHYS SYMPOSIUM*. Paris, 2010, 26 p.

38. Drinkwater M.R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., Floberghagen R., Kern M., Fehringer M. The GOCE gravity mission: ESA’s first core Earth explorer. *Proceedings of the 3rd international GOCE user workshop*. Noordwijk, 2006, pp. 6–8.

39. GOCE. Fact and figures. *European space agency*. Available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Facts_and_figures (accessed 19.10.2016).

40. Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer. *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_Field_and_Steady-State_Ocean_Circulation_Explorer (accessed 19.10.2016).

41. Douch K., Foulon B., Christophe B., Panet I. A new planar electrostatic gravity gradiometer for airborne surveys. *Journal of Geodesy*, 2013, vol. 89, no 12, pp. 1216–1219.

42. Marque J.P., Christophe B., Liorzou F., Bodovillé G., Foulon B., Guérard J., Lebat V. The ultra sensitive accelerometers of the ESA GOCE mission. *The*

59th International Astronautical Congress, Glasgow, 2008. Available at: <http://onera-windtunnel.com/dmph/goce/IAC-08-B1.3.7.pdf> (accessed 19.07.2016).

43. Silvestrin P. Control and navigation aspects of the new Earth observation missions of the European Space. *Annual Reviews in Control*, 2005, vol. 29, no. 2, pp. 247–260. doi: org/10.1016/j.arcontrol.2005.05.004

44. Christophe B., Marque J-P., Foulon B. Accelerometers for the ESA GOCE mission: one year of in-orbit results. Available at: https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=14168&name=DLFE-678.pdf (accessed 19.07.2016).

45. Schiermeier Q. Gravity mission to launch. *Nature*, 2009, vol. 458. Available at: <http://www.nature.com/news/2009/090311/full/458133a.html> (accessed 19.10.2016). doi: org/10.1038/458133a

46. Buckler G. Eye in the sky spots diamonds in the rough. *The Globe and Mail*, Mar. 13, 2009. Available at: <http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/eye-in-the-sky-spots-diamonds-in-the-rough/article17993239> (accessed 19.10.2016).

47. Wermuth M.K. Gravity Field Analysis from the Satellite Missions CHAMP and GOCE. Technische Universität München, 2008, 100 p.

48. Drennan R. Ready to market. *Mississauga News*, Jan 30, 2015. Available at: <http://www.mississauga.com/news-story/5295543-ready-to-market> (accessed 19.10.2016).

49. Anstie J. Preparation for flight testing the VK1 gravity gradiometer. *Airborne Gravity 2010*, 2010, pp. 5–12.

50. Flokstra J. Gravity Gradient Sensor Technology for future planetary missions. Enschede, University of Twente, 2005, 12 p.

51. Carroll K. Gravity gradiometry for lunar surface exploration. *42nd Lunar and Planetary Science Conference*, 2011. Available at: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1108.pdf> (accessed 19.10.2016).

52. Spencer H. Lunette: Lunar Farside Gravity Mapping by Nanosat. *19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2005. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1635&context=smallsat> (accessed 19.10.2016).

53. Allen J. Micro-System Inertial Sensing Technology Overview. Albuquerque, New Mexico, 2009, 32 p.

54. Tutorial: Noise in micromechanical systems. MEMS material. Available at: <http://www.kaajakari.net/~ville/research/tutorials/tutorials.shtml> (accessed 19.10.2016).

55. Li J., Fang J., Du M., Dong H. Analysis and fabrication of a novel MEMS pendulum angular accelerometer with electrostatic actuator feedback. *Microsystem technologies*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 9–16. doi: org/10.1007/s00542-012-1630-x

56. Yazdi N., Ayazi F., Najafi K. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86, no. 8, pp. 1640–1659.

57. Cuperus R. MEMS based gravity gradiometer for Space Application. Available at: <https://escies.org/download/webDocumentFile?id=7188> (accessed 19.10.2016).
58. De Simone A. Design and realization of a setup for mechanical tests on a MEMS based micro gravity-gradiometer. Delft, Delft University of Technology, 2008, 89 p.
59. Selig A. Development of a Micro-gradiometer for Planetary Gravity Field Mapping. Available at: http://jupiter-europa.cesr.fr/static_pages/presentations/Berlin/SRON_gravity.pdf (accessed 19.10.2016).
60. Ghose K. MEMS Inertial Sensor to Measure the Gravity Gradient Torque in Orbit. *Pour l'obtention du grade de docteur ès sciences école polytechnique fédérale de Lausanne*, 2012, no. 5231. Available at: http://infoscience.epfl.ch/record/169608/files/EPFL_TH5231.pdf (accessed 19.10.2016).
61. Murphy C.A. The Air-FTG airborne gravity gradiometer system. *ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop*, 2004, pp. 7–14.
62. Metzger E.H., Jirdtano A., Affleck C. Satellite borne gravity gradiometer study. Buffalo, NASA Goddard space flight center, 1976, 62 p.
63. Gerber M.A. Gravity gradiometry-something new in inertial navigation. *Astronautics Aeronautics*, 1978, vol. 16, pp. 18–26.
64. Richeson J.A. Gravity gradiometer aided inertial navigation within non-GNSS environments. ProQuest, 2008, 438 p.
65. Jekeli C. Precision free-inertial navigation with gravity compensation by an onboard gradiometer. *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2006, vol. 29, no. 3, pp. 704–713. doi: org/10.2514/1.15368
66. Flokstra J., Cuperus R., Wiegerink R.J., van Essen M.C. MEMS based gravity gradiometer for future planetary missions. *Cryogenics*, 2009, vol. 49, issue 11, pp. 665–668. doi: org/10.1016/j.cryogenics.2008.12.019
67. Matthews R. Mobile Gravity Gradiometry. Western, University of Western, 2002, 429 p.
68. Touboul P., Willemenot E., Foulon B., Josselin V. Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: synergy and evolution. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*, 1999, vol. 40, no. 3–4, pp. 321–327.
69. Lenoira B., Lévy A., Foulon B., Lamineb B., Christophea B., Reynaudb S. Electrostatic accelerometer with bias rejection for gravitation and Solar System physics. *Advances in Space Research*, 2011, vol. 48, pp. 1248–1257. doi: org/10.1016/j.asr.2011.06.005
70. Berman D. Effects of Mechanical Imperfections on Performance of a Rotating Gravity Gradiometer. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1968, vol. 5, no. 10, pp. 1193–1198.
71. Stibrany P., Carroll K.A. The microsat way in Canada. *Proc. 11th CASI Conference on Astronautics*, 2001, 10 p.
72. Gravity gradient earth sensor experiment on rexus 11. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/187717/files/ghose%20ESA%20Thun%202013.pdf> (accessed 12.11.2016).
73. Allasio A., Muzi D., Vinai B., Cesare S., Catastini G., Bard M., Marque J.P. GOCE: space technology for the reference Earth gravity field determination. *Proceedings of the European Conference for AeroSpace Sciences*, 2009, 13 p.
74. Vasilescu G. Electronic noise and interfering signals: principles and applications. Springer Science & Business Media, 2006, 709 p.
75. Carroll K.A. Near-Term Lunar Surface Gravimetry Science Opportunities. *Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group*, Maryland, 2015, 31 p.
76. Carroll K.A., Spencer H., Zee R.E. An Asteroid Lander/Rover for Asteroid Surface Gravity Surveying. *30-th Annual AIAA/USU Conference on small satellites*, 2016. Available at: <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3408&context=smallsat> (accessed 12.11.2016).
77. Steiger C., Romanazzo M., Emanuelli P. P., Floberghagen R., Fehringer M. The Deorbiting of ESA's Gravity Mission GOCE–Spacecraft Operations in Extreme Drag Conditions. *Proceedings SpaceOps, Pasadena, USA*, 2014, 12 p.
78. McBarnet, A. Gravity gradiometry has graduated! OE Digital. Saturday, 01 June 2013, <http://www.oedigital.com/geoscience/item/3201-gravity-gradiometry-has-graduated> (accessed 12.11.2016).

УДК: 621.039

Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок

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

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,
пр. Академика Лаврентьева, 1, 630090, г. Новосибирск, Россия

Поступила 28.09.2016

Принята к печати 08.11.2016

Процессы смешения потоков с различной температурой и концентрацией растворенной примеси весьма распространены в оборудовании ядерных энергетических установок. В ряде случаев такие процессы значительно влияют на ресурс реакторной установки и ее поведение в переходных и аварийных режимах работы. Целью работы было создание измерительной системы и тестового экспериментального стенда, проведение первичных исследований, внедрение метода пространственной кондуктометрии в практику исследования турбулентных потоков теплоносителя.

В ходе работы создан измерительный комплекс, включая сами пространственные датчики, и экспериментальный стенд для проведения исследований; выполнены первичные тесты. Особое внимание уделено процедурам калибровки и методической отработке применения кондуктометрических датчиков при измерении характеристик турбулентных потоков теплоносителя. Исследования проводили методом электрически контрастного трассера при спутно-струйном течении в закрытом канале круглого поперечного сечения. В ходе измерений получали как осредненные, так и нестационарные реализации измерительного сигнала.

Выполненная обработка данных эксперимента показывает хорошее их согласование с данными, полученными при помощи измерительных систем, основанных на других физических принципах действия. Получены калибровочные зависимости, создана методическая база настройки и применения измерительных систем с пространственными кондуктометрическими датчиками.

Приобретенный опыт работы с пространственными кондуктометрами позволил сформулировать принципы проведения исследований на крупномасштабных моделях основного оборудования ядерных энергетических установок. Пространственные датчики сетчатой конструкции зарекомендовали себя как перспективный тип вихреразрешающих измерительных устройств.

Ключевые слова: измерительная система, кондуктометрия, ядерный реактор, гидродинамика теплоносителя, турбулентные потоки.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

Адрес для переписки:

Баринов А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, 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, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: lxbarinov92@mail.ru

Для цитирования:

Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Главный В.Г.
Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 247–255.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

For citation:

Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Glavny V.G.
[Application features of spatial conductometry sensors in modelling of coolant flow mixing in nuclear power unit equipment].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 247–255 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

Application features of spatial conductometry sensors in modelling of coolant flow mixing in nuclear power unit equipment

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

¹Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia

²S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences,
Akademicheskaya Lavrentiev Ave., 1, 630090, Novosibirsk, Russia

Received 28.09.2016

Accepted for publication 08.11.2016

Abstract

Coolant flow mixing processes with different temperatures and concentrations of diluted additives widely known in nuclear power units operation. In some cases these processes make essential impact on the resource and behavior of the nuclear unit during transient and emergency situations. The aim of the study was creation of measurement system and test facility to carry out basic tests and to embed spatial conductometry method in investigation practice of turbulent coolant flows.

In the course of investigation measurement system with sensors and experimental facility was designed, several first tests were carried out. A special attention was dedicated to calibration and clarification of conductometry sensor application methodologies in studies of turbulent flow characteristics. Investigations involved method of electrically contrast tracer jet with concurrent flow in closed channel of round cross-section. The measurements include both averaged and unsteady realizations of measurement signal.

Experimental data processing shows good agreement with other tests acquired from another measurement systems based on different physical principles. Calibration functions were acquired, methodical basis of spatial conductometry measurement system application was created.

Gathered experience of spatial sensor application made it possible to formulate the principles of further investigation that involve large-scale models of nuclear unit equipment. Spatial wire-mesh sensors proved to be a perspective type of eddy resolving measurement devices.

Keywords: measuring system, conductometry, nuclear reactor, coolant hydrodynamics, turbulent flows.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

Адрес для переписки:

Баринов А.А.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: lxbarinov92@mail.ru

Для цитирования:

Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Главный В.Г.
Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 247–255.
DOI: 110.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

Address for correspondence:

Barinov A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: lxbarinov92@mail.ru

For citation:

Barinov A.A., Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Glavny V.G.
[Application features of spatial conductometry sensors in modelling of coolant flow mixing in nuclear power unit equipment].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 247–255 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-247-255

Введение

Современные исследования теплогидравлики внутриреакторных потоков теплоносителя являются частью расчетно-экспериментального обоснования конструкций оборудования ядерных энергетических установок. Несмотря на высокий уровень развития различных расчетных методов, экспериментальное исследование внутриреакторных теплогидравлических процессов также остается весьма актуальной задачей. Особенностью проведения экспериментальных исследований можно назвать изменение их направленности: традиционно эксперимент был предназначен для непосредственного получения значений параметров, участвующих в расчете, в то время как современный эксперимент зачастую ставится для подтверждения правильности работы той или иной расчетной модели или ее калибровки. Данное обстоятельство вызывает необходимость использования систем и методов измерений, обладающих высокой пространственно-временной разрешающей способностью. Обеспечение представительности экспериментов основывается при этом не только на характеристиках применяемых средств измерений, но также и на методах корректного переноса результатов с модельного на натурный процесс (поскольку в реакторной технике большинство экспериментов проводится при значениях параметров отличных от натуральных). Одним из экспериментальных методов, позволяющих измерять локальные характеристики в турбулентных потоках теплоносителя, является метод кондуктометрии с использованием датчиков различной пространственной конфигурации. Разработанные измерительные системы, основанные на данном методе, распространены в основном за рубежом [1, 2]. При этом в литературе не удастся найти каких-либо подробных описаний конструкций, методов калибровки и обработки данных таких измерительных систем, а также необходимых динамических и метрологических характеристик. Кроме того, данный метод плохо адаптирован к проведению верификационных экспериментов по смешению внутриреакторных потоков теплоносителя.

Адаптация метода пространственной кондуктометрии к исследованию внутриреакторных процессов предполагает создание методик использования матричных кондуктометров в условиях характерной для реакторных установок геометрии, проведение тестовых экспериментов,

определение калибровочных зависимостей, необходимых для получения надежных результатов измерений. Для решения данных задач в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан лабораторно-методический комплекс, включающий экспериментальный стенд, тестовые модели и кондуктометрическую измерительную систему с датчиками матричного типа.

Физические основы метода пространственной кондуктометрии

Метод пространственной кондуктометрии основан на регистрации пространственного распределения электрофизических свойств потока – удельной электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. В качестве основного измерительного прибора в данном методе используются кондуктометрические датчики, которые могут иметь различную геометрическую конфигурацию чувствительной области. В данной работе исследовались датчики сетчатого типа.

Сетчатый датчик (СД) в простейшем случае представляет собой комбинацию двух наборов электродов-струн, лежащих в параллельных плоскостях, отстоящих на некотором расстоянии друг от друга (рисунок 1). Струны каждого слоя параллельны друг другу, в то время как сами слои повернуты на некоторый угол вокруг центральной оси датчика, совпадающей с осью изучаемого потока среды.

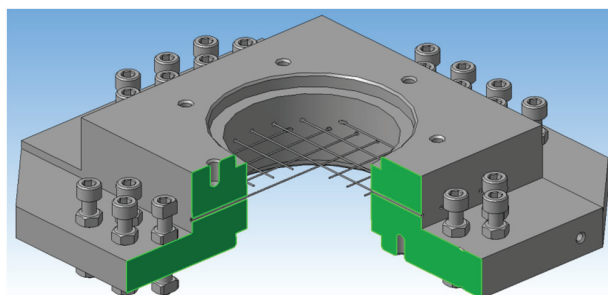


Рисунок 1 – Сетчатый кондуктометрический датчик с круглой проточной частью

Figure 1 – Conductive wire mesh sensor with round flow-through part

Таким образом, любые две струны соседних слоев представляют собой скрещивающиеся отрезки. Область, расположенная между струнами датчика в месте их видимого пересечения, образует кондуктометрическую ячейку, параметры

схемы замещения которой зависят от ряда факторов: геометрии ячейки, материалов струн, характеристик присутствующей в ячейке среды, параметров подаваемого и снимаемого с электродов ячейки измерительного сигнала. Совокупность кондуктометрических ячеек между электродами образует измерительную область СД. Данная конструкция дает возможность измерять электрохимические свойства среды, находящейся внутри измерительной области датчика, с высоким пространственным и временным разрешением.

Для жидкостей (в том числе для водных растворов диссоциирующих солей) характерно наличие проводимости, обусловленной движением ионных пар. Удельная проводимость при этом не зависит от частоты. Можно показать [2], что при частотах измерительного сигнала, ограниченных десятками МГц, комплексная диэлектрическая проницаемость может быть упрощенно записана в виде:

$$\varepsilon = \varepsilon - \phi \frac{\lambda}{\omega \varepsilon_0}, \quad (1)$$

где ε – член, характеризующий статическую относительную диэлектрическую проницаемость (иногда называемую диэлектрической константой); λ – статическая удельная электрическая проводимость, См/м; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота измерительного сигнала, ε_0 – электрическая постоянная (8,85 пФ/м). Далее предполагается эквивалентная схема замещения измерительной ячейки на низких частотах в виде параллельно соединенных емкости и сопротивления, чья проводимость Y определяется выражением с учетом геометрического фактора ячейки k_g , 1/м:

$$Y = \frac{1}{k_g (\lambda + j\omega \mu_0 \mu)}. \quad (2)$$

Учитывая наличие активной и реактивной составляющих проводимости, можно записать выражения для проводимости G и емкости ячейки C на указанных частотах:

$$G = \frac{\lambda}{k_g}. \quad (3)$$

Для определения электрических параметров кондуктометрических ячеек привлекаются измерительные каскады на инвертирующих операционных усилителях (рисунок 2). В ходе первичной калибровки установлено, что для водных раство-

ров солей в низкочастотной области сигналов вкладом емкостной составляющей проводимости можно пренебречь. Поэтому определение статической удельной проводимости можно осуществлять измерением отклика измерительного каскада при должной балансировке цепи обратной связи.

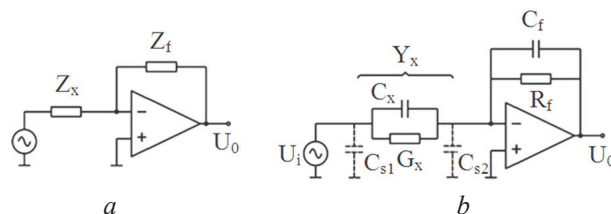


Рисунок 2 – Измерительный каскад на инвертирующем операционном усилителе: *a* – базовая схема; *b* – конфигурация для измерения импеданса емкостного типа; U_i – измерительный сигнал; U_o – измеряемый отклик звена; Z_x – исследуемый импеданс; Z_f – цепь обратной связи; C_{si} – паразитные емкости подводящих и отводящих проводников

Figure 2 – Measurement cascade based on OpAmp: *a* – basic circuit; *b* – configuration for measurement of capacitance-type impedance; U_i – measurement signal; U_o – measured cascade response; Z_x – impedance to measure; Z_f – feedback loop; C_{si} – parasitic capacitances of wires

Для проведения кондуктометрических исследований разработан и изготовлен тестовый вариант измерительной системы (рисунок 3) на основе универсального шасси сбора данных *Agilent 34980A*, включающего в себя модуль матричного коммутатора (для коммутации генерирующих и приемных электродов СД) и модуль АЦП (для регистрации показаний системы). К системе не предъявлялись высокие требования по пространственно-временной разрешающей способности, так как основным ее назначением служила отработка методик работы с СД, получение калибровочных зависимостей и первичных экспериментов.

В состав системы введен логарифмический детектор, преобразующий амплитуду переменного высокочастотного сигнала в постоянный уровень напряжения по логарифмическому закону, который затем измеряется модулем АЦП.

В качестве измерительного сигнала используется истинный синус (монократные колебания). Переменные резисторы дают возможность масштабирования уровня сигнала в зависимости от измеряемых уровней проводимости среды и применяемого типа датчика (конфигурации его измерительных ячеек).

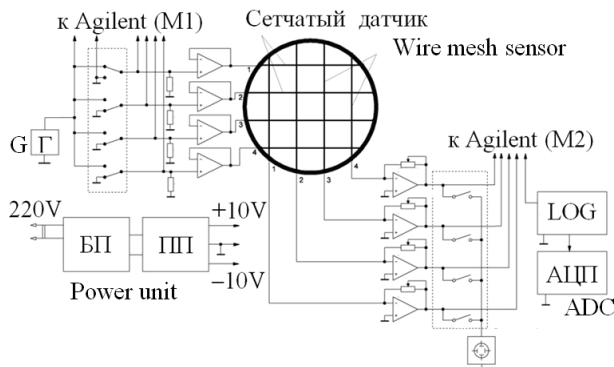


Рисунок 3 – Упрощенная схема системы измерения пространственного распределения удельной проводимости: Г – генератор; БП – блок питания; ПП – преобразователь питания; LOG – система логарифмического детектирования; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; M1, M2 – матричные модули № 1, 2 Agilent 34980A

Figure 3 – Simplified block-diagram of spatial conductive measurement system: G – signal generator; Power unit – power source with voltage converter; LOG – system of logarithmic detection; ADC – analog to digital converter; M1, M2 – matrix commutative modules of Agilent 34980A

Для управления измерительной системой разработан программный комплекс «Кондуктометрия», представляющий собой компьютерный интерфейс для управления системой и мониторинга данных, получаемых с сетчатого датчика. В программном комплексе реализованы возможности построения распределения измеряемого сигнала, записи значений в файл, построения энергетических спектров, расчета автокорреляционных функций сигнала ячеек датчика во времени. Характеристики созданной системы сведены в таблицу.

Методика и результаты первичных тестов

Созданный тестовый измерительный комплекс позволил провести регистрацию пространственного поля статической удельной электропроводности в турбулентном потоке. Данная величина однозначно связана с содержанием, что дает возможность восстановить поле концентрации растворенной примеси. Стоит отметить, что при одинаковой удельной проводимости среды в сечении сетчатого датчика значения напряжения для разных измерительных ячеек существенно различаются. По этой причине возникает необходимость получения калибровочных зависимостей для пересчета измеренных значений напряжения в величину проводимости и

концентрации растворенной примеси для каждой измерительной ячейки.

Таблица / Table

Характеристики тестовой измерительной системы Testing measurement system capabilities

Параметр/Parameter	Значение/Value
Частота сигнала генератора Generator frequency	40 kHz
Вид сигнала генератора Generator signal type	$\sin(\omega t + \varphi)$
Амплитуда сигнала генератора Generator signal amplitude	1,0 V
Скорость опроса при опросе одного канала Scanning speed in one channel mode	770 Hz
Скорость опроса полного сечения датчика (8 × 8) в режиме «быстрого» опроса (1 замер на ячейку) Scanning speed in fast mode for the whole sensor (8 × 8 cells, 1 sample per cell)	1/3 fps
Разрешающая способность АЦП ADC resolution	0,1 mV
Напряжение питания каскадов системы Supply voltage of measurement cascades	±10 V
Рабочий диапазон по проводимости Resolved conductance range	20–2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Экспериментальное применение метода матричной кондуктометрии основано на отслеживании динамики переноса электрически контрастного трассера в потоке. В качестве трассера использовался водный раствор соли NaCl; его кинематическая вязкость и плотность слабо зависят от содержания в широком диапазоне температур, что дает возможность считать вводимую примесь гидродинамически «пассивной».

Сильное размытие среды в поперечном сечении турбулентного потока обуславливает необходимость использования высокопроводящих растворов в качестве трассера [3]. Из условий обеспечения необходимой чувствительности измерительной системы были выбраны следующие значения удельной электрической проводимости сред: для основного потока – 450–600 мкСм/см; для трассера – до 20 000 мкСм/см.

Для проведения исследований создан экспериментальный стенд (рисунок 4), представляющий собой два независимых гидравлических контура, через которые прокачивается специально подготовленная вода [4].

Основными элементами гидравлического контура являются: экспериментальная модель, сетчатый датчик, ресивер, насосы, питательные баки, дренажный бак, трубопроводы и арматура. В состав стенда также входят описанный выше измерительный комплекс и блок управления.

Принудительная циркуляция среды в обоих контурах обеспечивается вихревыми насосами.

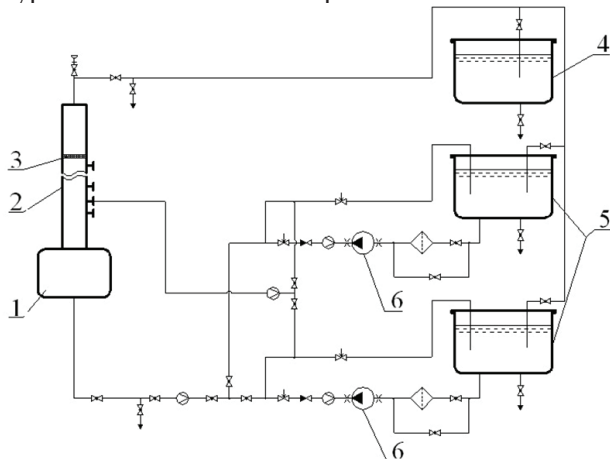


Рисунок 4 – Гидравлическая схема стенда: 1 – ресивер; 2 – экспериментальная модель; 3 – сетчатый датчик; 4 – дренажный бак; 5 – питательные баки; 6 – насосы

Figure 4 – Hydraulic schema of the circuit: 1 – receiver volume; 2 – experimental model; 3 – wire mesh sensor; 4 – drainage tank; 5 – feed tanks; 6 – pumps

Контроль параметров сред основного потока и трассера осуществлялся с помощью двуканального кондуктометра, позволяющего одновременно измерять проводимость и температуру.

Экспериментальная модель (рисунок 5) представляет собой канал круглого поперечного сечения с внутренним диаметром 60 мм.

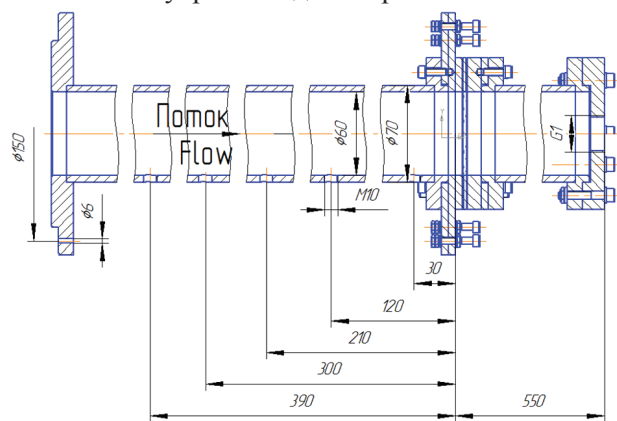


Рисунок 5 – Вертикальная экспериментальная модель в сборе с датчиком (повернута на 90° по часовой стрелке)

Figure 5 – Vertical experimental model in assembly with the wire mesh (rotated clockwise by 90°)

Длина модели выбрана с учетом протяженности участка гидродинамической стабилизации потока. Предусмотрена возможность подачи трассера на различных расстояниях от плоскости сетчатого датчика (30–390 мм).

Методика проведения исследований гидродинамических процессов заключалась в следующем: солевой трассер через инъекционный капилляр изокинетически подавался в центр канала соосно направлению потока. С помощью сетчатого датчика проводился замер проводимости по поперечному сечению потока при подаче солевого трассера на различном расстоянии до места установки датчика.

Перед началом экспериментов были проведены калибровочные замеры по определению точного вида зависимостей для пересчета измеряемого сигнала в величины проводимости и концентрации примеси. Кроме того, для учета существенной зависимости удельной проводимости раствора от температуры были получены поправочные зависимости приведения показаний системы к температуре калибровки.

В качестве величины, характеризующей концентрацию среды-трассера в ячейках датчика, использовалась безразмерная относительная концентрация – измерительный скаляр $\Phi_{i,j}$:

$$\Phi_{i,j} = \frac{c_{meas,i,j} - c_{bulk,i,j}}{c_{trace} - c_{bulk,i,j}}, \quad (5)$$

где $c_{meas,i,j}$ – измеренное значение концентрации соли в ячейке датчика i,j ; $c_{bulk,i,j}$ – показания фонового замера (без примеси) в той же ячейке; c_{trace} – концентрация примеси в среде, подаваемой в качестве трассера. На основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости радиального распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

Турбулентное движение жидкости сопровождается возникновением неупорядоченных турбулентных структур – вихрей. Статистическими характеристиками турбулентности являются средние масштабы вихревых структур и интенсивность турбулентных пульсаций [5]. Для их определения использовался частотно-энергетический спектр пульсаций, построенный на основе флуктуаций значений концентрации трассера.

В результате экспериментальных замеров при различных местах ввода трассера получены следующие данные:

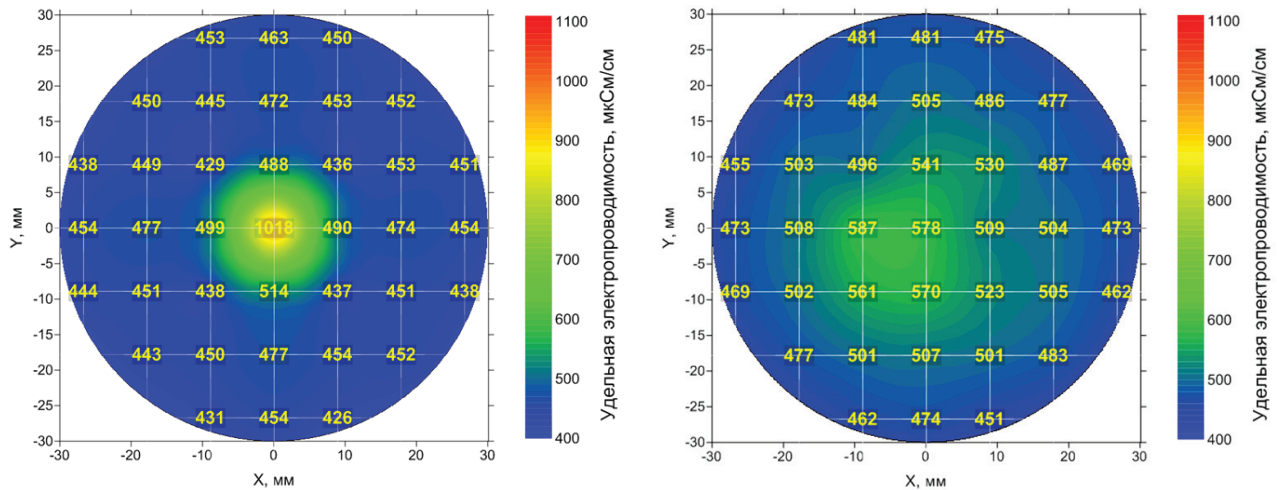
- произведена регистрация временных реализаций измерительного скаляра от времени для всех ячеек датчика при различных расстояниях от подачи солевого трассера до места установки сетчатого датчика. Из полученных зависимостей определялись средние по времени значения, а также пульсационные составляющие измерительного скаляра для каждой ячейки сетчатого датчика. Усредненные значения использовались

для построения распределений измерительного скаляра, а на основе пульсационных составляющих строились частотно-энергетические спектры сигналов;

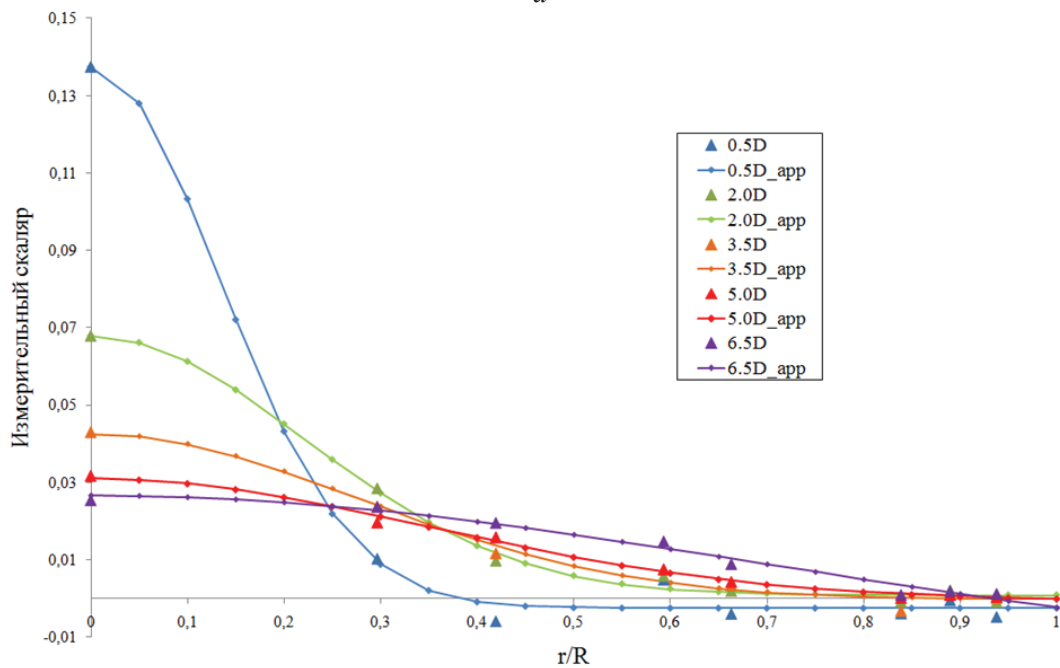
– построены распределения (картограммы) измерительного скаляра (5) по сечению экспериментальной модели при различных положениях

инжекционного капилляра, позволяющие судить о наличии характерного для турбулентного потока размытия трассера с увеличением расстояния от точки подачи;

– построены графики и картограммы радиальной дисперсии трассера для характерных сечений экспериментальной модели (рисунок 6);



a



b

Рисунок 6 – Дисперсия примеси в турбулентном потоке: *a* – картограммы интерполированного осредненного распределения проводимости в сечениях $0,5D$ и $5D$ от места впуска трассера; *b* – осредненные графики распределения измерительного скаляра и аппроксимации (на рисунке «app») функцией Гаусса (6); D – гидравлический диаметр канала; r/R – относительное расстояние по радиусу канала

Figure 6 – Dispersion of tracer in turbulent flow: *a* – interpolation plot of mixing scalar averaged distribution in sections $0,5D$ and $5D$ from tracer injection; *b* – averaged distribution profiles and their fits (at the figure «app») by Gauss function (6); D – hydrolic diameter of channel; r/R – relative radial distance

– наилучшим образом полученные результаты аппроксимируются кривой, близкой по форме к графику функции Гаусса вида:

$$\varphi(\rho) = c_1 \cdot e^{\frac{-(\rho - \langle \rho \rangle)^2}{2\langle \rho^2 \rangle}} + c_2, \quad (6)$$

где $\varphi(\rho)$ – безразмерный измерительный скаляр (5); ρ – относительное расстояние; c_1, c_2 – коэффициенты распределения. Форма графика согласуется с теорией Тейлора, согласно которой распределение частиц трассера в спутном турбулентном потоке подчиняется модели «случайного блуждания» [6–8];

– диффузия трассера из зоны подачи (оси потока) вызывает снижение концентрации примеси в центральной ячейке и увеличение ее в периферийных ячейках по мере движения вниз по потоку;

– частотный анализ реализаций сигнала позволяет выделить диапазон волновых чисел основных энергонесущих вихрей: $k = 20\text{--}75 \text{ м}^{-1}$, что соответствует размерам 13–50 мм). Полученная оценка размера крупных вихрей в потоке соответствует порядку характерного размера течения, т.е. диаметра гидравлического канала (60 мм).

Заключение

Создан экспериментальный стенд для исследования гидродинамики теплоносителя при помощи метода матричной кондуктометрии, включая тестовый кондуктометрический датчик, экспериментальную модель, измерительную систему, программный комплекс *WMS_Pro*.

Разработаны методики проведения исследований, включая методику работы на экспериментальном стенде, методику обработки первичных данных эксперимента, методики калибровки датчика и приведения показаний к необходимому уровню температуры, методики получения спектральных характеристик регистрируемого сигнала.

Проведено исследование характерных особенностей турбулентного потока жидкости в экспериментальной модели при помощи метода матричной кондуктометрии. Получено хорошее согласие полученных оценок осредненных характеристик потока с данными других исследователей.

Выполнены замеры по определению характеристик турбулентных вихревых структур. Обработка результатов данных замеров позволила весьма достоверно оценить временные и геометрические ($k = 20\text{--}75 \text{ м}^{-1}$) масштабы вихрей, рас-

пределения спектральной плотности энергии турбулентности в ядре потока.

Приобретенный опыт работы с пространственными кондуктометрами позволил сформулировать принципы проведения исследований на крупномасштабных моделях основного оборудования ядерных энергетических установок. Пространственные датчики сетчатой конструкции зарекомендовали себя как перспективный тип вихреразрешающих измерительных устройств.

В настоящее время совместными усилиями НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ИТ СО РАН им. С.С. Кутателадзе и АО «ОКБМ Африкантов» создана и проходит стадию опытной эксплуатации бытродействующая измерительная система ЛАД-36, позволяющая производить параллельную регистрацию сигналов с частотой до 1,8 МГц на 36 каналах. Промышленную апробацию данная измерительная система будет проходить на верификационном исследовательском стенде по изучению смещения неизотермических потоков в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Результаты, полученные в ходе экспериментов, будут положены в обоснование расчетных моделей и продление ресурса парогенераторов РУ РИТМ-200 нового универсального атомного ледокола.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список использованных источников

1. Velasco, H.F. Rodrigues Application of wire mesh sensors in multiphase flows / H.F. Velasco, O.M.H. Pena // Flow measurement and instrumentation. – 2015. – Vol. 45 – P. 255–273.
2. Da Silva, M.J. Impedance sensors for fast multiphase flow measurement and imaging : Ph.D. dissertation / M.J. Da Silva. – Technische Universität Dresden, 2008.
3. Ylonen, A. Single-phase crossmixing measurements in a 4×4 rod bundle / A. Ylonen, W.M. Bissels, H.M. Prasser // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, P. 84–93.
4. Внедрение метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринов

[и др.] // Труды НГТУ. – Н. Новгород, 2015. – № 1. – С. 139–145.

5. Вохник, О.М. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур / О.М. Вохник [и др.]. – М. : Университетская книга, 2012. – 81 с.

6. Taylor, G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe / G. Taylor // Proceedings of the Royal Society of London. – 1954. – P. 446–468.

7. Полунин, М.А. Осесимметричная турбулентная струя в спутном потоке / М.А. Полунин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 170–171.

8. Развитие стендовой базы НГТУ им. Р.Е. Алексеева для верификации CFD программ / С.М. Дмитриев [и др.] // Сборник трудов НТС «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике». – Н. Новгород, 2016. – С. 17–18.

Acknowledgments

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the bounds of contract № 02.G25.31.0124 of 03.12.2014 (in acceptance with the Russian Government decree of 09.04.2010 № 218).

References

1. Velasco H.F., Pena O.M.H. Rodrigues Application of wire mesh sensors in multiphase flows. *Flow*

measurement and instrumentation, 2015, no. 45, pp. 255–273. **doi:** 10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.024

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

3. Ylonen A., Bissels W.M., Prasser H.M. Single-phase crossmixing measurements in a 4×4 rod bundle. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, no. 241, pp. 84–93. **doi:** 10.1016/j.nucengdes.2011.04.014

4. Barinov A.A. [et al.] [Introduction of matrix conductometry method for investigation of hydrodynamical processes in nuclear reactor equipment]. *Trudy NGTU*, N. Novgorod Publ., 2015, no. 1, pp. 139–145 (in Russian).

5. Vokhnik O.M. [et al.] *Modelirovaniye i obrabotka stokhasticheskikh signalov i struktur* [Modeling and processing of stochastic signals and structures]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2012, 81 p. (in Russian).

6. Taylor G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1954, pp. 446–468.

doi: 10.1098/rspa.1954.0130

7. Polunin M.A. Axisymmetrical turbulent jet in adjacent flow. *Scientific transport problems of Siberia and Far East*, 2009, no. 1, pp. 170–171 (in Russian).

8. Dmitriev S.M. [et al.] [Development of experimental facilities at NNSTU n.a. R.E. Alekseev for verification of CFD programs]. *Proceedings of scientific and technical seminar “Problems of verification and application of CFD-codes in nuclear engineering”*, N. Novgorod Publ., 2016, pp. 17–18 (in Russian).

УДК 621.039.76+614.876+519.245

Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation monitoring

Zhukouski A.¹, Anshakou A.¹, Biryla A.¹, Chyrykala U.¹, Kanavalau Y.¹, Nichyparchuk A.¹, Savitski A.¹, Khrutchinsky A.², Kutsen S.²

¹SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, 220005, Minsk, Belarus

²Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University
Bobruiskaya str., 11, 220030, Minsk, Belarus

Received 06.10.2016

Accepted for publication 25.11.2016

Abstract

In order to solve the problem of continuous or periodic monitoring of water areas affected by radioactive contamination in the result of scheduled emissions in nuclear power plants or in the result of emergency situations in nuclear fuel cycle plants we need to develop measurement instruments with advanced mathematics and program support to assess the level of radioactive contamination with required accuracy. The aim of theoretical research was to optimize detection device construction, estimate spectrometer metrological parameters in given measurement geometries, and determine effective position of detection device in the process of *in situ* measurements.

This device consists of spectrometric scintillation probe packed into sealed container (detection device) based on NaI(Tl) crystal of $\varnothing 63 \times 63$ mm or $\varnothing 63 \times 160$ mm size, cable reel with deep-sea cable and a tablet PC for data processing and displaying. The container withstands static hydraulic pressure up to 5 MPa and can be used for measurements at depths of 500 m maximum. Probe measures energy distribution of gamma-radiation with energy from 70 keV to 3000 keV. The implemented three-dimensional system for detection device position and orientation determination allows automatic operation of the device (without operator) for water areas or bottom sediment scanning. The spectrometer can output measurement results with three-dimensional geographical coordinates as index maps of distribution with necessary resolution and accuracy. Monte Carlo models of spectrometer and controlled objects are developed in order to determine the detector response functions to given radionuclides in given measurement geometries without use of expensive standard measures of activity.

Multifunction gamma-spectrometer for *in situ* radiation monitoring of water areas and bottom sediments was developed and constructed. In the result of theoretical researches the response functions have been calculated in the form of theoretical spectra of monitored radionuclides in definite measuring geometries. The results of mathematical modeling of the gamma-emitting transfer process allowed to estimate effective position of detection device for *in situ* measurements of specific activity radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs in bottom sediments.

Keywords: submersible gamma-spectrometer, detection efficiency, geometry of measuring, *in situ* measuring.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

Адрес для переписки:

Жуковский А.И.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь
e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Address for correspondence:

Zhukouski A.
SPE «ATOMTEX»,
Gikalo St., 5, 220005, Minsk, Belarus
e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Для цитирования:

Zhukouski A., Anshakou A., Biryla A., Chyrykala U., Kanavalau Y., Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.
Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation monitoring.

Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 256–261.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

For citation:

Zhukouski A., Anshakou A., Biryla A., Chyrykala U., Kanavalau Y., Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.
Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation monitoring.

Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 256–261.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

Гамма-спектрометр для радиационного мониторинга акваторий и донных отложений

Жуковский А.¹, Аншаков О.¹, Бирило А.¹, Чирикало В.¹, Коновалов Е.¹,
Ничипорчук А.¹, Савицкий А.¹, Хрущинский А.², Кутень С.²

¹УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,

ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 06.10.2016

Принята к печати 25.11.2016

Задачи постоянного или периодического мониторинга водоемов, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате штатных выбросов АЭС или в результате возникновения нештатных ситуаций на предприятиях топливного ядерного цикла, приводят к необходимости разработки соответствующих средств измерений с современным математическим и программным обеспечением, позволяющих оценить уровень радиоактивных загрязнений с заданной точностью. Цель теоретических исследований заключалась в оптимизации конструктива устройства детектирования, определении метрологических параметров спектрометра в заданных геометриях измерения, определении эффективного положения устройства детектирования спектрометра в процессе *in situ* измерений удельной активности радионуклидов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs в донных отложениях с использованием разработанных Монте-Карло моделей: устройства детектирования, воды и донных отложений.

Спектрометр представляет собой многофункциональный прибор, состоящий из размещаемого в герметичном контейнере спектрометрического сцинтилляционного блока детектирования с кристаллом NaI(Tl) размерами Ø 63 × 63 мм или Ø 63 × 160 мм, вьюшки с глубоководным кабелем и планшетного компьютера для обработки и отображения информации. Контейнер устойчив к статическому гидравлическому давлению до 5 МПа, что позволяет проводить измерения на глубинах до 500 м. Устройство детектирования позволяет измерять энергетическое распределение импульсов гамма-излучения с энергией от 70 до 3000 кэВ. Реализованная система определения положения устройства детектирования в пространстве позволяет использовать спектрометр в автоматическом режиме (без участия оператора) для сканирования водной акватории и донных отложений. Результаты измерения заданной величины с трехмерными географическими координатами могут быть оперативно представлены в виде карт-схем распределения с необходимой дискретностью и точностью. Для определения функций отклика детектора к заданным радионуклидам в требуемых геометриях измерения без использования физических дорогостоящих стандартных мер активности разработаны Монте-Карло модели спектрометра и объектов контроля.

Для радиационного контроля водной среды и донных отложений методом *in situ* разработан и изготовлен многофункциональный портативный гамма-спектрометр. В результате теоретических исследований были рассчитаны функции отклика спектрометра к контролируемым радионуклидам в заданных геометриях измерения. Результаты математического моделирования процесса переноса гамма-излучения позволили определить эффективную позицию устройства детектирования в процессе *in situ* измерений активности радионуклидов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs в донных отложениях.

Ключевые слова: погружной гамма-спектрометр, эффективность регистрации, геометрия измерения, *in situ* измерения.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

Адрес для переписки:

Жуковский А.И.

УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Address for correspondence:

Zhukouski A.

SPE «ATOMTEX»,

Gikalo St., 5, 220005, Minsk, Belarus

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Для цитирования:

Zhukouski A., Anshakou A., Birylo A., Chyrykala U., Kanavalau Y.,
Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.

Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation
monitoring.

Приборы и методы измерений.

2016. – Т. 7, № 3. – С. 256–261.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

For citation:

Zhukouski A., Anshakou A., Birylo A., Chyrykala U., Kanavalau Y.,
Nichyparchuk A., Savitski A., Khrutchinsky A., Kutsen S.

Gamma-spectrometer for water areas and bottom sediments radiation
monitoring.

Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].

2016, vol. 7, no. 3, pp. 256–261.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-256-261

Introduction

Water systems are an important part of the environment and are also exposed to radiation pollution as the result of accidents at nuclear fuel cycle enterprises.

Radiation monitoring of the environment, in particular, water areas and sediments, is a prerequisite for ensuring radiation safety during normal operation of nuclear power plants, as well as in the case of emergency situations at nuclear fuel cycle enterprises. Due to technological requirements nuclear power plants are located near large bodies of water (seas, lakes, large rivers) for heat removal and core cooling [1]. Events at Fukushima nuclear power plant have showed that radioactive substances fell not only on fruit and rice fields, but also in ponds and ocean, thus water pollution monitoring represents an urgent and important task [2, 3]. Significant amount of radionuclides which accumulates at the bottom as a result of sedimentation, are absorbed by fish and plants, and may eventually get into the human body [4]. Sediments radiation control is the same important task along with water radiation control.

Activity of controlled radionuclides is usually estimated by the method of representative sampling with transportation to laboratory, preparation and measurement in stationary gamma-spectrometers. Despite attempts to reduce measurement result uncertainty associated with sample selection and preparation activities for radiation control of sediments, this technique has some major disadvantages associated primarily with a high probability of random and systematic errors. Due to difficulties with obtaining of quality bottom samples and time-consuming measurement, there emerges a need for activity measurement of controlled radionuclides by *in situ* [5].

Specialists in many countries are developing and manufacturing submersible gamma-spectrometers for water radiation monitoring [2, 5–11]. Theoretical and experimental researches presented in their works have been carried out to optimize and improve metrology and design parameters of equipment, aimed primarily for monitoring and water radiation control. At the same time, events at Fukushima nuclear power plants in 2011 have showed that determination of controlled radionuclides' activity in sediments is still a high priority task [3]. Portable and lightweight submersible spectrometers with in situ measurement functionality allows for rapid estimation of specific activity of controlled radionuclides in water and bottom sediments with required accuracy [2, 5].

The aim of theoretical researches have consisted in optimization of detection device construction, definition of metrological parameters of spectrometer in special measuring geometries, estimation effective position of detection device to measure specific activity radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs in bottom sediments by in situ, using Monte-Carlo models of detection device, water and bottom sediments.

Materials and methods

Submersible spectrometer [12] (hereinafter spectrometer) is a modular instrument, consisting of temperature and impact resistant watertight stainless steel container (detection device) with scintillator probe based on NaI(Tl) detector of $\varnothing 63 \times 63$ mm or $\varnothing 63 \times 160$ mm size inside, deep water cable reel and tablet computer.

Spectrometer withstands static hydraulic pressure up to 5 MPa, which is equivalent to immersion to 500-meter depth. The position of detection device is determined by a position sensor (gyroscope), which is used to identify the moment when the de-

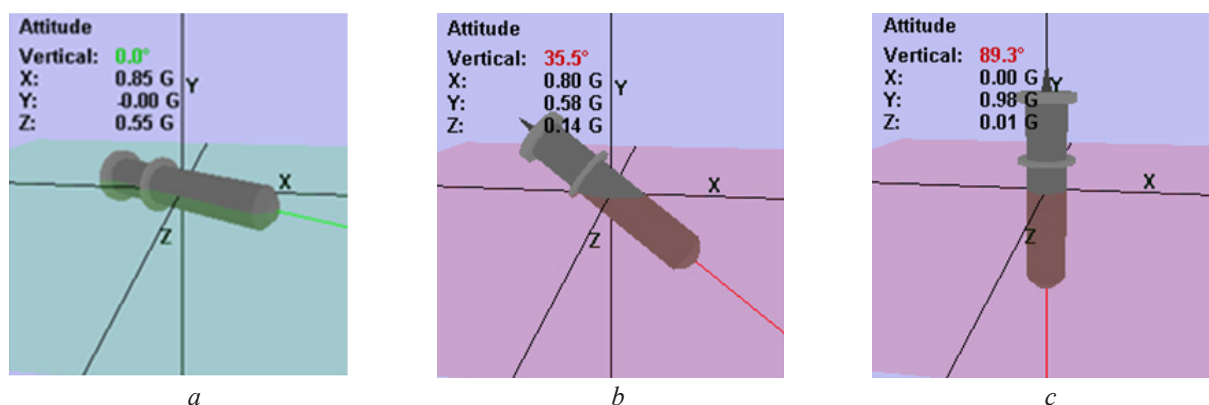


Figure 1 – Possible positions of detection device in water: *a* – horizontal position; *b* – intermediate position; *c* – vertical position

tection device contacts the bottom, and for its proper positioning (Figure 1).

Additionally, spectrometer is equipped with a pressure sensor to determine the depth of immersion and humidity sensor to control its integrity. Communication with detection device is carried out by means of cable. Data from detection device are sent to tablet computer and processed by special application software. The values of energy distribution of gamma-radiation pulses, result of radionuclides identification, specific activities of controlled radionuclide or ambient dose equivalent rate of gamma-radiation are displayed on tablet computer screen.

Energy range of detected gamma-radiation, in which the energy distribution is measured, is from 70 to 3000 keV. Relative energy resolution for gamma-radiation of ^{137}Cs (661.7 keV) does not exceed 8 %. Measurement range of gamma-radiation dose rate is from 0.01 to 100 $\mu\text{Sv/h}$.

Spectrometer has internal systems for continuous automatic LED stabilization of energy scale and digital temperature compensation of measuring path. Operating temperature range of spectrometer is from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Numerical Monte-Carlo simulation is a generally recognized solution for verification, calibration, design optimization, and definition of spectrometers' metrological parameters and basic provisions of measurement procedures, when reference materials are not available or cannot be created [13–17].

MCNP software (Monte-Carlo N-Particle Transport, Los Alamos National Laboratory, USA) of version 4A has been used for Monte-Carlo simulation [18]. At the primary stage, the detection device verification has been carried out with standard spectrometric gamma sources containing gamma-emitting radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs . In the course of experiment and Monte-Carlo simulation the sources were located at a distance of 5 cm from lateral surface of container with detection device. Amplitude deviation of full absorption peak (FAP) of gamma-radiation with energy of 661.7 keV for ^{137}Cs as well as 597.4 keV and 796.4 keV for ^{134}Cs at the level of 2–3 % showed a high degree of spectrometer's compliance with Monte-Carlo model.

Determination of detection device's response function to radionuclides ^{134}Cs and ^{137}Cs in given measurement geometry has been carried out using Monte-Carlo model of water in 4π geometry and of sediment in 2π geometry with specified radionuclide

uniformly distributed in specified volume of water or sediment.

For determination of detection efficiency for specified value of gamma-radiation energy the effective volume of water has been taken into account, which is determined by the value of effective radius – radius of contaminated sphere generating more than 90 % of spectrometer response function [19]. Here the tolerance of spectrometer readings for water measurement, which volume is determined by effective radius, is within the range from 5 to 10 % relative to spectrometer readings for measurement of sphere with conventionally infinite radius containing gamma-photons uniformly distributed over its volume.

The results of Monte-Carlo simulation in 4π measurement geometry in the form of calculated theoretical spectra allowed to determine the relation of detection efficiency to the energy of gamma-radiation for spectrometer based on NaI(Tl) scintillation crystal of $\varnothing 63 \times 63$ mm and $\varnothing 63 \times 160$ mm size (Figure 2), which is used for calculation of specific activity of most dose-forming radionuclides [20].

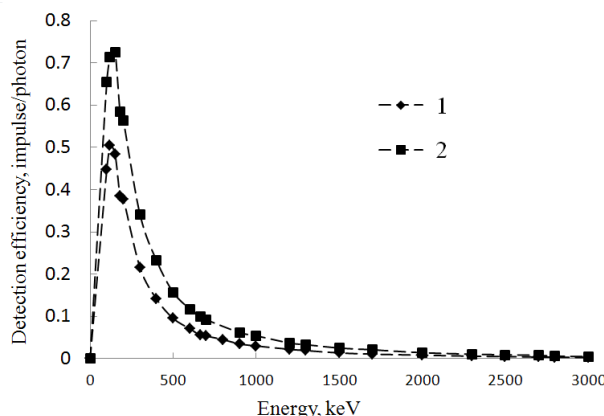


Figure 2 – The relation of detection efficiency to gamma-radiation energy in 4π measurement geometry based on NaI(Tl) scintillation detector: 1 – $\varnothing 63 \times 63$ mm size; 2 – and $\varnothing 63 \times 160$ mm size

One of the most important spectrometer's parameters in any geometry is sensitivity to measured radionuclide or relation of detection efficiency to energy of gamma-radiation. Spectrometer's detection limit depends on this metrology parameter along with mathematical algorithm of processing of gamma-impulse energy distribution. In order to set requirements for sediment radiation control methods and find optimal detection device position relative to the object of control in which the spectrometer demonstrates maximum sensitivity to controlled

radionuclides. Monte-Carlo model of detection device and contaminated bottom sediments with contaminated layer thickness $D = 10$ cm has been used (Figure 3).

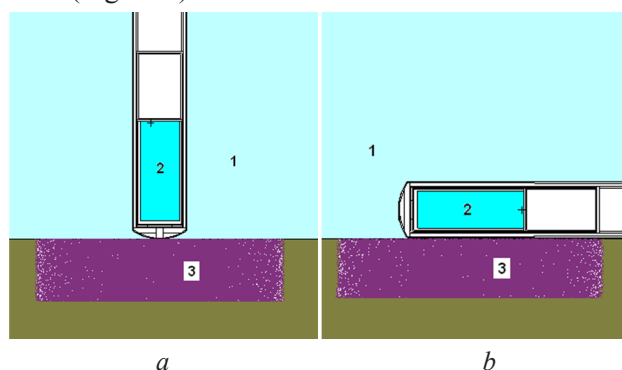


Figure 3 – Monte-Carlo model of detection device and contaminated bottom sediments in in situ measurement geometry: *a* – Vertical; *b* – Horizontal. 1 – Seabed layer of water; 2 – NaI(Tl) detector of 63×160 mm size; 3 – Bottom sediments

The density of Monte-Carlo sediment model has been taken as 1.3 g/cm^3 . See Table [19] for elemental composition of sediments used in simulation of gamma-radiation transfer in 2π measurement geometry.

Table

Elemental composition of sediments

Chemical element	W/w, %
Si	24.32
Al	5.07
Fe	1.04
Ca	0.31
Mg	0.62
K	1.21
Na	1.08
O	62.18
P	0.03
S	0.07
C	3.53
H	0.38
N	0.19

Figure 4 shows the dependence of integral spectrometer response from the radius of sediment site contaminated by ^{137}Cs radionuclide for detection device based on NaI(Tl) scintillation crystals of $\varnothing 63 \times 63$ mm and $\varnothing 63 \times 160$ mm size when placing the detection device vertically and horizontally relative to the source of gamma-radiation.

Seabed layer of water has a significant impact on detector response function during in situ

measurements of sediments. Seabed water layer diffuses and weakens gamma-radiation emitted from the source (sediment layer contaminated by radionuclides) in detector direction. Scattered gamma-photons make additional contribution to low-energy part of spectrometer response function. This effect increases when detection device is used according to the scheme shown in Figure 4a with detection device based on scintillation crystal, which length exceeds its diameter. In this case integral response in the form of response function increases, resulting in reduced detection limit, while significant increase of scattered component introduces additional error into determination of thickness of contaminated sediment layer. Such factors as small effective area of gamma-radiation source relative to the size of the scintillation crystal, lower value of scattered component of instrument spectrum relative to response in FAP, higher sensitivity of measurement by side spectrometer's surface demonstrate the advantages of measurement of contaminated sediments according to scheme shown in Figure 4b. Also, fast and accurate determination of measurement start (Horizontal position on the bottom) allows reduction in time required to carry out measurements at check point.

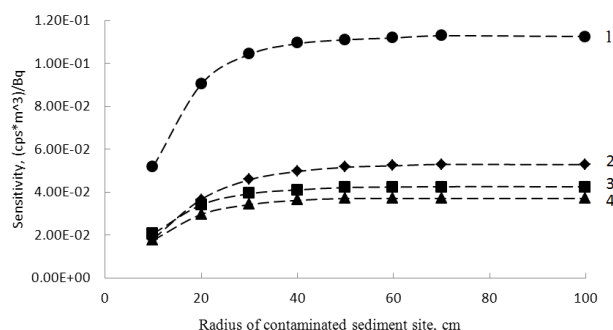


Figure 4 – Dependence of integral spectrometer response from the size of contaminated sediment site: 1 – horizontal position of detection device based on NaI(Tl) crystal of $\varnothing 63 \times 160$ mm size; 2 – vertical position of detection device based on NaI(Tl) crystal of $\varnothing 63 \times 160$ mm size; 3 – horizontal position of detection device based on NaI(Tl) crystal of $\varnothing 63 \times 63$ mm size; 4 – vertical position of detection device based on NaI(Tl) crystal of $\varnothing 63 \times 63$ mm size

Conclusion

The peculiarity of the conducted researches is in the application of Monte-Carlo simulation method in the achievement of the objectives.

Monte-Carlo models of detection devices, water and sediments have allowed determination of necessary spectrometer response function in the form of spectra of controlled radionuclides in required measurement geometries.

The results of theoretical research allowed determination of metrological parameters of detection devices based on NaI(Tl) scintillation crystals of $\varnothing 63 \times 63$ mm and $\varnothing 63 \times 160$ mm size in basic measurement geometries (2π and 4π) and establishing a set of rules and procedures for specific activity measuring of controlled radionuclides without sampling and preparation of water and sediment samples.

References

1. Grishin D.S., Kuchin N.L., Kiziurov V.C., Laykin A.I., Miheev U.V., Triumphov N.H., Chistiakov O.B., Kharitonov I.A. [Submersible gamma-spectrometers – the application experience and prospects of using]. ANRI, 2016, no. 2, pp. 10–21 (in Russian).
2. Thornton B., Ohnishi S., Ura T., Odano N., Sasaki Sh., Fujita Ts., Watanabe T., Nakata K., Ono Ts., Ambe D. Distribution of local ^{137}Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. Marine Pollution Bulletin, 2013, no. 74, pp. 344–350. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.06.031
3. Zhukouski A., Chirikalo V., Guзов V., Kozhemyakin V., Kutsen S., Khrutchinsky A., Fukuhara T., Yajima T., Mogi M., Mogi K., Chudakov V. AT6104DM gamma-spectrometer for radiation monitoring water areas and bottom sediments. Results of mathematical and experimental researches. *Problemy prikladnoy spektrometrii i radiometrii* [Problems of applied spectroscopy and radiometry], St. Petersburg, 2015, pp. 160–163.
4. Appleby L.J., Dewell L., Mishara Yu.K. The ways of migration of artificial radionuclides in the Environment. In F. Warner and Harrison (eds.). Moscow, Mir Publ., 1999, pp. 512 (in Russian).
5. Kazennov A.Y., Hapanov I.A., Pimenov A.E. [Methods of operational radiation surveys of coastal waters fleet bases with the help of submersible gamma-spectrometers]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], 2010, vol. 9, no. 2, pp. 100–108 (in Russian).
6. Jones D.G. Development and application of marine gamma-ray measurements: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, no. 53, pp. 313–333.
7. Vlastou R., Ntziou I.Th., Kokkoris M., Papadopoulos C.T., Tsabaris C. Monte-Carlo simulation of γ -ray spectra from natural radionuclides recorded by a NaI detector in the marine environment. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, no. 64, pp. 116–123. doi: 10.1016/j.apradiso.2005.07.011
8. Aakenes U.R., Radioactivity monitored from moored oceanographic buoys. *Chemistry and Ecology*, 1995, no 10, pp. 61–69. doi: 10.1080/02757549508035330.
9. Baranov I., Kharitonov I., Laykin A., Olshansky Yu. Devices and methods used for radiation monitoring of sea water during salvage and transportation of the Kursk nuclear submarine to dock. *Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Section A*, 2003, no. 505, pp. 439–443. doi: 10.1016/S0168-9002(03)01116-1
10. Wedekind C., Shilling G., Güttmüller M., Becker K. Gamma-radiation monitoring network at sea. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, no. 50, pp. 733–741. doi: 10.1016/S0969-8043(98)00062-1
11. Povinec P.P., Osvath I., Baxter M.S. Underwater gamma-spectrometry with HPGe and NaI(Tl) detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 1996, no. 47, pp. 1127–1133. doi: 10.1016/S0969-8043(96)00118-2
12. Birila A., Chirikala V., Zhukouski A. *Spektrometr pogruzhnoy* [Submersible Spectrometer]. Patent BY no. 3278, 2015.
13. Zhukouski A., Mogi K., Kutsen S. [In situ measurement of soil radioactivity]. *Vestsi NAN Belarusi, Fiziko-tekhnicheskaya seriya* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physico-technical series], 2016, no. 3, pp. 105–110 (in Russian).
14. Zhang Y., Li Ch., Liu D., Zhang Yi., Liu Ya. Monte-Carlo simulation of a NaI(Tl) detector for in situ radioactivity measurements in the marine environment. *Applied Radiation and Isotopes*, 2015, no. 98, pp. 44–48. doi: 10.1016/j.apradiso.2015.01.009
15. Kinchakov V.S. Performance optimization of a deep-sea scintillation gamma detector. *Technical Physics*, 2006, vol. 51, no. 1, pp. 134–138. doi: 10.1134/S106378420601021X
16. Dreyzin V.E., Sideleva N., Logvinov D. [Simulation instrumental gamma spectra of scintillation detector using a macro approach]. *ANRI*, 2014, no. 3, pp. 2–12 (in Russian).
17. Bagatelas C., Tsabaris C., Kokkoris M., Papadopoulos C.T., Vlastou R. Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4π geometry based on Monte-Carlo simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, no. 165, pp. 159–168. doi: 10.1007/s10661-009-0935-4
18. Briestmeister J.F. Ed. MCNP- A general Monte-Carlo N-particle transport code, Version 4A. Report LA-12625-M, Los Alamos. NM, Los Alamos National Laboratory, 1994.
19. Zhukouski A., Kutsen S., Khrutchinsky A., Tolkachev A., Guзов V., Kojemiakin V., Chudakov V. [Evaluation of the area of influence of the contaminated soil region in solving the problems of radiation monitoring by in situ]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 1 (8), pp. 119–124 (in Russian).
20. Yekidin A.A., Zhukovski M.V., Vasianovich M.E. [Identification of the main dose-forming radionuclides in nuclear power plant emissions]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], 2016, vol. 120, no. 2, pp. 106–108 (in Russian).

УДК 681.785.554

Спектральная фильтрация изображений посредством дисперсионных систем

Гулис И.М., Купреев А.Г.

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

Поступила 27.09.2016

Принята к печати 15.11.2016

Приборы для спектральной фильтрации изображений являются важным элементом систем дистанционного зондирования, медицинской диагностики и технологического контроля. Цель работы – анализ функциональных особенностей и характеристик двух предлагаемых вариантов монохроматоров изображения, основанных на дисперсионной спектральной фильтрации.

Первый вариант основан на использовании дисперсионного монохроматора, в котором коллиматорный и камерный объективы формируют телескопическую систему, в плоскости промежуточного изображения которой размещается дисперсионный элемент. Второй вариант основан на использовании двойного монохроматора с вычитанием дисперсии при обратном прохождении.

Для варианта с телескопической системой выполнены оценки спектрального разрешения и пространственного разрешения, определяемого аберрациями и дифракцией на входной щели. Проведено численное моделирование и макетирование прибора. Показано, что при ширине выделяемого спектрального интервала 10 нм в видимой области размеры аберрационно-лимитируемого кружка рассеяния варьируются от 10–20 мкм в центре до 30 мкм на краях изображения с размерами 23–27 мм. Монохроматор с вычитанием дисперсии позволяет варьировать достигаемое в отдельной точке изображения спектральное разрешение (до 1 нм и выше) изменением ширины промежуточной щели, однако особенностью является изменение в значительных пределах выделяемой центральной длины волны по полю изображения.

Рассмотренные схемные решения дисперсионных монохроматоров изображения представляются перспективными и обладают преимуществами в сравнении с системами на основе перестраиваемых фильтров по достижимому спектральному разрешению и возможности его оперативного варьирования, спектральному контрасту. Монохроматор на основе телескопической системы характеризуется простотой устройства и достаточно большим полем изображения, однако имеет ограниченное светопропускание из-за малого размера входной апертуры. Монохроматор с вычитанием дисперсии имеет большее светопропускание, позволяет обеспечить высокое спектральное разрешение при условии регистрации полного куба данных в серии установок дисперсионного элемента.

Ключевые слова: спектроскопия с пространственным разрешением, монохроматор изображения, дисперсионная система, спектральная фильтрация.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

Адрес для переписки:

Гулис И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: gulis@bsu.by

Address for correspondence:

Gulis I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by

Для цитирования:

Гулис И.М., Купреев А.Г.
Спектральная фильтрация изображений посредством дисперсионных систем.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 262–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

For citation:

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
[Spectral filtration of images by means of dispersive systems].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 262–270 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

Spectral filtration of images by means of dispersive systems

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.

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

Received 27.09.2016

Accepted for publication 15.11.2016

Abstract

Instruments for spectral filtration of images are an important element of the systems used in remote sensing, medical diagnostics, in-process measurements. The aim of this study is analysis of the functional features and characteristics of the proposed two image monochromator versions which are based on dispersive spectral filtering.

The first is based on the use of a dispersive monochromator, where collimating and camera lenses form a telescopic system, the dispersive element of which is within the intermediate image plane. The second version is based on an imaging double monochromator with dispersion subtraction by back propagation.

For the telescopic system version, the spectral and spatial resolutions are estimated, the latter being limited by aberrations and diffraction from the entrance slit. The device has been numerically simulated and prototyped. It is shown that for the spectral bandwidth 10 nm (visible spectral range), the aberration-limited spot size is from 10–20 μm at the image center to about 30 μm at the image periphery for the image size 23–27 mm. The monochromator with dispersion subtraction enables one to vary the spectral resolution (up to 1 nm and higher) by changing the intermediate slit width. But the distinctive feature is a significant change in the selected central wavelength over the image field.

The considered designs of dispersive image monochromators look very promising due to the particular advantages over the systems based on tunable filters as regards the spectral resolution, fast tuning, and the spectral contrast. The monochromator based on a telescopic system has a simple design and a rather large image field but it also has a limited light throughput due to small aperture size. The monochromator with dispersion subtraction has higher light throughput, can provide high spectral resolution when recording a full data cube in a series of measuring acts for different dispersive element positions.

Keywords: imaging spectroscopy, image monochromator, dispersive system, spectral filtering.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

Адрес для переписки:

Гулис И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: gulis@bsu.by

Address for correspondence:

Gulis I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: gulis@bsu.by

Для цитирования:

Гулис И.М., Купреьев А.Г.
Спектральная фильтрация изображений посредством дисперсионных систем.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 262–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

For citation:

Gulis I.M., Kupreyeu A.G.
[Spectral filtration of images by means of dispersive systems].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 262–270 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-262-270

Введение

Спектроскопия с пространственным разрешением (СПР) востребована и применяется в большинстве областей, где необходимо получение спектральной информации о протяженных объектах. Среди них – оценка состояния растительных [1] и водных ресурсов [2], пищевая промышленность [3], мониторинг городской среды [4] и промышленных объектов [5], задачи обеспечения безопасности и правопорядка [6], медицинские и биологические приложения [7–10]. Основными классами задач, решаемых СПР, являются классификация областей, поиск целей, детектирование изменений, оценка количества участков разных типов.

Для ряда приложений мультиспектрального анализа необходимо единовременное получение изображения области пространства с высоким пространственным разрешением при умеренном спектральном (во многих задачах распознавания целей и детектирования изменений по фрагментам спектров с широкими структурными элементами приемлема ширина выделяемой спектральной полосы порядка 10 нм [11, 12]), однако не все типы аппаратуры СПР оптимальны для этого. К примеру, в дисперсионных спектрометрах с заметающим (pushbroom) сканированием изображение объекта в ограниченном спектральном диапазоне можно получить лишь после регистрации полного куба данных [13], в системах единовременной съемки зачастую не обеспечивается необходимое пространственное разрешение, присутствуют существенные хроматические аберрации [14]. Приборы для СПР, ориентированные на получение одномоментных снимков наблюдаемой области в ограниченном спектральном диапазоне, можно выделить в отдельный класс монохроматоров изображения.

В настоящее время монохроматоры изображения реализуются преимущественно на основе спектральной фильтрации посредством полосовых и перестраиваемых фильтров [12]. Ограничения таких систем вынуждают искать альтернативные подходы, одним из которых является дисперсионная спектральная фильтрация [13]. Важные ее преимущества – высокое спектральное разрешение и эффективное подавление фоновой засветки на длинах волн за пределами выделяемой полосы, что особенно существенно при малой ширине последней относительно рабочего спектрального диапазона.

Целью настоящей работы является анализ характеристик разработанного монохроматора изображения на основе телескопической системы, рассмотрение особенностей спектральной фильтрации с использованием предложенного авторами ранее монохроматора изображения с вычитанием дисперсии при обратном прохождении, а также сопоставление обоих подходов.

Спектральная фильтрация на основе дисперсионной телескопической системы

Телескопическая система объективов позволяет сформировать на выходной апертуре угловое распределение световых пучков, аналогичное распределению на входной апертуре. Спектральная селекция осуществляется диспергирующим элементом, размещенным в промежуточной плоскости изображения телескопа. Вариант реализации на основе дифракционной решетки и системы из коллиматорного и камерного объективов, размещенных подобно телескопической системе Кеплера, представлен на рисунке 1.

Расстояние от входной щели 1 до коллиматорного объектива 2 равно его переднему фокусному расстоянию f_{1p} , расстояние от коллиматорного объектива 2 до дифракционной решетки 3 равно заднему фокусному расстоянию f_{1b} . Благодаря этому проходящие через щелевую входную апертуру 1 коллимированные световые пучки от бесконечно удаленного объекта фокусируются объективом 2 вблизи плоскости дифракционной решетки, формируя действительное изображение. В то же время все лучи, проходящие через одну и ту же точку входной щели, падают на дифракционную решетку параллельно друг другу, поэтому диспергированные пучки одной длины волны также взаимно параллельны и дают изображение входной щели на расстоянии f_{2b} от камерного объектива 4. Объектив 4 располагается на переднем фокусном расстоянии f_{2p} от дифракционной решетки, поэтому пучки, формирующие промежуточное изображение вблизи решетки, после диспергирования и прохождения через объектив коллимированы.

Соответственно, в области задней фокальной плоскости объектива 4, отвечающей изображению щели 1 в узком спектральном диапазоне, формируется угловое распределение световых пучков, аналогичное распределению во входной щели.

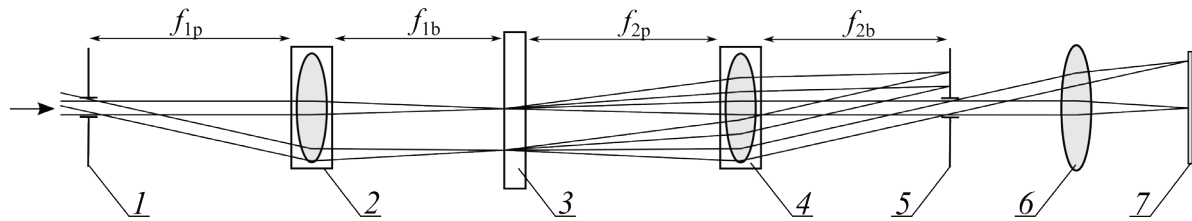


Рисунок 1 – Принципиальная схема спектральной фильтрации на основе дисперсионной телескопической системы: 1 – входная апертура; 2 – коллиматорный объектив; 3 – диспергирующий элемент; 4 – камерный объектив; 5 – выходная апертура; 6 – изображающий объектив; 7 – матричный фотодетектор; f – фокусные расстояния объективов; индексы 1 и 2 относятся к коллиматорному и камерному объективам; « p » и « b » – переднее и заднее фокусное расстояние

Figure 1 – The principle of spectral filtering by means of dispersive telescopic system: 1 – entrance aperture; 2 – collimating lens; 3 – dispersive element; 4 – camera lens; 5 – exit aperture; 6 – imaging lens; 7 – matrix photodetector; f – focal distance of objectives; indices 1 and 2 are related to collimating and camera lenses respectively; « p » and « b » denote primary and back focus

Таким образом, через щель, размещенную в задней фокальной плоскости объектива 4, целиком пройдет совокупность световых пучков выделенного спектрального диапазона, по угловому распределению идентичная пучкам на входе в систему. Для формирования на фотодетекторе 7 изображения наблюдаемой области используется объектив 6.

Ширина выделяемого спектрального интервала $\Delta\lambda$ определяется характеристиками спектрального изображения в плоскости 5. При узких щелях доминирует абберационная составляющая аппаратной функции, при широких – щелевая составляющая. Форма аппаратной функции при щелях одинаковой ширины (полагаем, что ширина выходной щели равна ширине изображения входной) будет треугольной, так что полуширина выделяемой спектральной полосы:

$$\Delta\lambda = \frac{d\lambda}{dl} \Delta l_{slit}, \quad (1)$$

где Δl_{slit} – ширина щели (входной апертуры); $d\lambda/dl$ – обратная линейная дисперсия. Перестройку выделяемой спектральной полосы целесообразно осуществлять поворотом дифракционной решетки 3, при этом необходимо учитывать изменение аббераций решетки при различном ее наклоне.

Пространственное разрешение системы определяется изображающими характеристиками объектива 6 и искажениями, вносимыми в угловое распределение световых пучков вследствие их неколлимированности при падении на дифракционную решетку (абберации решетки).

Уменьшение ширины апертур 1 и 5 в соответствии с (1) повышает спектральное разре-

шение, а также повышает пространственное разрешение за счет уменьшения ширины пучков и аббераций системы. Уменьшение высоты щели 1 способствует снижению искажений типа *smile*. При этом светосила при сокращении площади входной апертуры падает, поэтому выбор оптимальных параметров щелевой входной апертуры должен осуществляться исходя из требований к разрешению и светосиле прибора. Необходимо также учитывать дифракцию на щелевой входной апертуре. Дифракционное размытие в предлагаемой системе можно оценить как:

$$\delta l_{diff} = f \frac{\lambda}{\Delta l_{slit}} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \frac{b \cos \beta}{k}, \quad (2)$$

где f – фокусное расстояние изображающего объектива; k – порядок дифракции; b – постоянная решетки; β – угол дифракции. Таким образом, при сужении щели дифракционное размытие возрастает. В частном случае нормального падения пучков на дифракционную решетку (2) приводится к виду:

$$\delta l_{diff} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sqrt{\left(\frac{b}{k}\right)^2 - \lambda^2}.$$

К примеру, при использовании дифракционной решетки 600 штр./мм ($b = 1667$ нм) в -1 порядке дифракции, $\Delta\lambda = 10$ нм и $\lambda = 500$ нм дифракционное размытие $\delta l_{diff} \approx 80$ мкм, а с решеткой 1200 штр./мм при той же ширине выделяемой спектральной полосы снижается до приблизительно 40 мкм. Следует отметить, что такое размытие проявляется только вдоль координаты, соответствующей направлению дисперсии.

На основе предложенного подхода разработано схемное решение монохроматора изображения (рисунок 2). В качестве коллиматорного, камерного и изображающего объективов использован четырехлинзовый анастигмат средней светосилы «Юпитер-37А» (фокусное расстояние 135 мм; относительное отверстие 1:3,5; угловое поле зрения 18°). Отражательная дифракционная решетка 600 штр./мм, –1-й порядок дифракции.

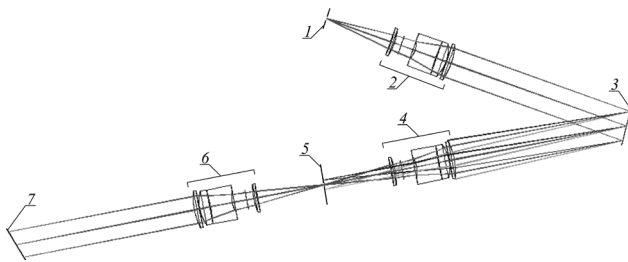


Рисунок 2 – Оптическая схема монохроматора изображения на основе дисперсионной телескопической системы: 1 – входная щель; 2 – коллиматорный объектив; 3 – дифракционная решетка; 4 – камерный объектив; 5 – выходная щель; 6 – изображающий объектив, 7 – детектор

Figure 2 – The optical design of image monochromator based on dispersive telescopic system: 1 – entrance slit; 2 – collimating lens; 3 – diffractive grating; 4 – camera lens; 5 – exit slit; 6 – imaging lens; 7 – photodetector

Численное моделирование системы в программе оптического дизайна показало, что при ширине щелей монохроматора около 1 мм достигается выделение спектральной полосы шириной около 10 нм. Форма кружков рассеяния свидетельствует о наличии внеосевых aberrаций на краю поля. В центре поля наибольший размер кружка рассеяния составляет 10–20 мкм, на краях поля с размерами 27 × 23 мм доходит до 30 мкм.

В соответствии с оптической схемой рисунок 2 изготовлен макет дисперсионной телескопической системы, зарегистрированы квазимонохроматические изображения тестовых объектов – транспарантов с полиграфической цветной печатью – при освещении их широкополосным источником (лампой накаливания). Характеристики системы полностью соответствуют результатам теоретических оценок и численного моделирования.

Спектральная фильтрация на основе системы с вычитанием дисперсии

Второй вариант дисперсионной фильтрации изображений основан на использовании вычи-

тания дисперсии в изображающей оптической системе для устранения пространственно-спектрального «размытия» изображения. Обычно вычитание дисперсии используют для понижения уровня рассеянного света в оптической системе спектрометра [15], однако входная и выходная апертуры в ней щелевые. Изображение протяженной в двух измерениях входной апертуры в дисперсионном спектральном приборе «размывается» из-за смещения друг относительно друга спектральных изображений. В предложенном методе «размытие» устраняется при обратном прохождении через оптическую систему монохроматора, которое эквивалентно прохождению через монохроматор с вычитанием дисперсии [16].

Спектральная фильтрация в такой системе осуществляется отверстием в непрозрачной маске, расположенной в плоскости промежуточного изображения (которое формируется как результат прямого прохождения). Через отверстие проходит лишь часть световых пучков, формирующих совокупность смещенных друг относительно друга спектральных изображений протяженной входной апертуры. Эта часть после вычитания дисперсии при обратном прохождении формирует изображение входной апертуры в спектральной полосе, параметры которой определяются положением и шириной отверстия в маске. Благодаря тому, что вычитание дисперсии осуществляется обратным прохождением через ту же оптическую систему, сравнительно легко обеспечить требуемую идентичность двух монохроматоров, так что для сканирования по спектральному диапазону достаточно поворота единственного диспергирующего элемента (рисунок 3). Симметричный разворот светового пучка для обратного прохождения осуществляется посредством двух плоских зеркал, расположенных подобно уголкового отражателю.

Ширина выделяемого спектрального интервала составляет:

$$\Delta\lambda = \frac{b \cos \beta}{k f_{cam}} \Delta d,$$

где Δd – ширина отверстия в маске в направлении дисперсии; f_{cam} – фокусное расстояние камерного объектива [17]. Таким образом, спектральное разрешение (полуширина пропускаемой спектральной полосы) определяется как диспергирующими характеристиками системы, так и шириной отверстия в маске. Вследствие того, что спектральное разрешение не зависит от ширины входной щели, для одновременного изображе-

ния протяженной области можно использовать широкую входную апертуру без ухудшения спектрального разрешения. Количественная оценка показывает, что при решетке 1200 штр./мм, работающей в первом порядке дифракции, $\beta \sim 0^\circ$, $f_{col} = f_{cam} = 500$ мм и $\Delta d = 6$ мм $\Delta \lambda \approx 10$ нм; при $\Delta d = 0,6$ мм $\Delta \lambda \approx 1$ нм, где f_{col} – фокусное расстояние коллиматорного объектива

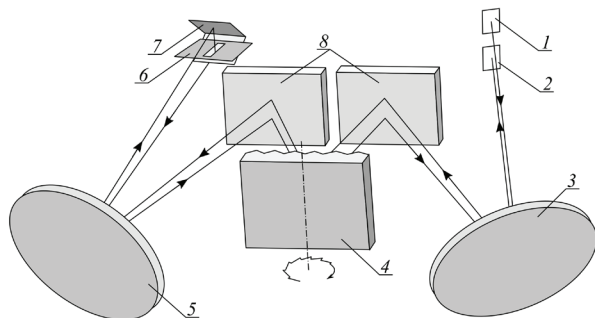


Рисунок 3 – Схема монохроматора изображения с вычитанием дисперсии при обратном прохождении: 1 – входная апертура; 2 – выходная апертура с ПЗС-матрицей; 3, 5 – зеркальный объектив; 4 – диспергирующий элемент; 6 – маска с отверстием; 7 – отражатель; 8 – плоское зеркало; штрихпунктирный отрезок – ось поворота диспергирующего элемента

Figure 3 – The principle of image monochromator with dispersion subtraction at back propagation: 1 – entrance aperture; 2 – exit aperture with a CCD-camera; 3, 5 – reflective lens; 4 – dispersing element; 6 – mask with an aperture; 7 – reflector; 8 – flat mirror; dash-dot line denotes the axis of dispersing element revolution

Спектральный интервал $\Delta \lambda$, в котором осуществляется изображение точки объекта, смещается вдоль изображения объекта в направлении дисперсии (рисунок 4). Относительное смещение интервала определяется соотношением ширины выходной апертуры $\Delta x''$ и ширины отверстия в маске Δd , а также увеличением решетки Γ_g :

$$\frac{\Delta \lambda_{shift}}{\Delta \lambda} = \Gamma_g \frac{\Delta x''}{\Delta d} = \frac{1}{\cos \psi + \sin \psi \operatorname{tg} \alpha} \frac{\Delta x''}{\Delta d},$$

где α – угол падения пучка на дифракционную решетку; ψ – угол между падающим и дифрагированным пучками.

Пространственное разрешение системы с вычитанием дисперсии определяется ее изображающими характеристиками, поэтому уменьшение aberrаций является важной задачей. Ее решение осложняется протяженностью входного отверстия и необходимостью пространственно разделять входящие в систему и выходящие из нее световые пучки. Исходя из повышенных

требований к качеству изображения, разработан малоабберационный вариант оптической системы монохроматора изображения с вычитанием дисперсии [18]. Схема рассчитана на работу в видимом диапазоне при относительном отверстии 1:7–1:5, фокусное расстояние сферических зеркальных объективов 333,5 мм, их диаметры не превышают 150 мм. Размер входной и выходной апертур $7,18 \times 5,32$ мм (соответствует размерам матрицы с диагональю $1/1,8''$). В качестве диспергирующего элемента использована дифракционная решетка 1200 штр./мм. Оценочные габаритные размеры оптической схемы не превышают $350 \times 300 \times 280$ мм. Сканирование рабочего спектрального диапазона осуществляется поворотом дифракционной решетки (охват диапазона шириной 400 нм осуществляется поворотом решетки на $15,5^\circ$). Полученные посредством численного моделирования в программе ZEMAX® результаты свидетельствуют о том, что типичная полуширина профиля кружка рассеяния не превышает 10 мкм (в незначительной по площади периферийной части матрицы достигает 15–20 мкм).

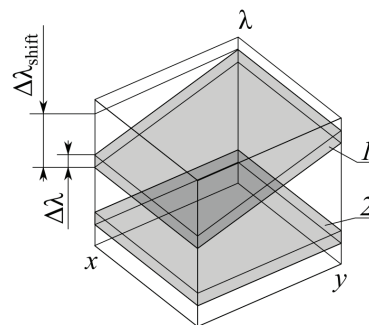


Рисунок 4 – Фрагмент куба данных, одновременно регистрируемый системой с вычитанием дисперсии (1) и телескопической системой (2): $\Delta \lambda$ – ширина выделяемого спектрального интервала; $\Delta \lambda_{shift}$ – полный спектральный охват на протяжении детектора. Направление дисперсии параллельно оси y

Figure 4 – The fragment of data cube that is registered at a time by system with dispersion subtraction (1) and telescopic system (2): $\Delta \lambda$ – width of spectral interval; $\Delta \lambda_{shift}$ full spectral range over the detector. The direction of dispersion is parallel to y-axis

Особенностью малоабберационного варианта системы является необходимость блокировки паразитной засветки фотодетектора через отверстия в плоских зеркалах, достигаемая использованием светопоглощающих экранов. Из-за световых потерь на отверстиях и экранах эффективная числовая апертура уменьшается (при номиналь-

ной числовой апертуре 0,11 эффективная не менее 0,087). В остальном обеспечивается высокое светопропускание, ограниченное практически только дифракционной эффективностью решетки (обычно более 70 %).

Особенности схем дисперсионной спектральной фильтрации

Предложенные подходы обеспечивают повышенный спектральный контраст (эффективное подавляется излучение с длинами волн за пределами выделяемого спектрального диапазона). Достигается это тем, что излучение разных длин волн направляется в разные области пространства, так что через отверстие в маске (либо щелевую апертуру – для телескопической системы) проходит свет ограниченного спектрального диапазона (а также некоторая часть рассеянного света). В то же время через каждую точку апертуры перестраиваемого фильтра проходит излучение широкого спектра, поэтому вследствие остаточного пропускания за пределами номинально выделяемой спектральной полосы в регистрируемую интенсивность будет вносить вклад излучение «отсеченных» длин волн [14]. Особенно заметным вклад «отсеченных» спектральных полос будет при регистрации полосы малой интенсивности и наличии в спектре высокоинтенсивных компонент, а также при малой ширине выделяемого интервала относительно рабочего диапазона. Принципиально важно, что при сужении выделяемого спектрального интервала (уменьшении ширины отверстия в маске или апертуры) спектральный контраст в дисперсионных системах увеличивается (из-за уменьшения пропускания рассеянного света), а в системах на основе перестраиваемых фильтров – снижается.

Преимуществом обоих методов является взаимная независимость спектрального и пространственного разрешения, что отличает их от распространенных методов дисперсионной спектральной фильтрации, использующих щелевое (*pushbroom*) сканирование (у последних пространственное и спектральное разрешение увязаны с шириной входной щели [19]). Такая независимость позволяет выбирать параметры регистрации куба данных исходя из методических требований. К примеру, спектральное разрешение может быть понижено только лишь за счет увеличения ширины щели в маске (для системы с вычитанием дисперсии) либо входной щели (для

телескопической системы). При этом пространственное разрешение в первом случае останется неизменным, а во втором – повысится (за счет уменьшения дифракционного размытия).

Особенностью монохроматора изображения на основе дисперсионной телескопической системы является необходимость использования щелевой входной апертуры, ограничивающей светопропускание и обуславливающей снижение (одномерное) пространственного разрешения за счет дифракции. В то же время конструктивная и технологическая простота этой системы является ее несомненным достоинством. Проблема понижения пропускания может в значительной мере сниматься использованием светосильного входного телескопа (предпочтительно с варьируемым увеличением). Возможность использования в данной системе больших фотоприемных матриц позволяет снизить влияние дифракционного размытия на достижимое пространственное разрешение и получить число пространственно разрешаемых элементов вдоль «координаты размытия» вплоть до 500–1000. Важно также, что обсуждаемая система достаточно просто может быть преобразована в систему для одновременного получения набора квазимонохроматических изображений для нескольких длин волн («полихроматор изображения») путем сегментирования выходной апертуры 5 (рисунок 1) и направления пучков с участков, отвечающих разным длинам волн, на различные фотоприемные матрицы (или участки одной матрицы).

Монохроматор изображения на основе системы с вычитанием дисперсии обладает более высоким светопропусканием (эффективное относительное отверстие в рассмотренном примере порядка 1:6), а из-за больших размеров входного отверстия дифракционные эффекты существенно менее значимы. Спектральное разрешение может варьироваться в более широких пределах, чем в телескопической системе (оно определяется не размером входной апертуры, а шириной Δd отверстия в промежуточной маске). В то же время вследствие другого подхода к спектральной селекции разные точки входной апертуры изображаются в смещенных друг относительно друга спектральных интервалах (рисунок 4). Это может ограничить применимость метода, к примеру, в задачах оперативного поиска целей по излучению узкого спектрального интервала, однако при регистрации изображений в широких спектральных полосах либо при восстановлении по резуль-

татам нескольких последовательных измерений (для различных установок дифракционной решетки) достаточно большой области (x, y, λ) -куба такая особенность несущественна.

При оценке перспектив разработанных методов важным фактором является и возможность реализации соответствующих приборных решений на основе простых оптических элементов (плоских дифракционных решеток, плоских и сферических зеркал). Благодаря этому такие решения технологичны и пригодны для массового производства.

Заключение

Предложенное решение монохроматора изображения на основе телескопической системы, наряду с общими преимуществами, обусловленными использованием дисперсионной спектральной фильтрации (повышенный спектральный контраст, взаимная независимость пространственного и спектрального разрешения, возможность варьирования спектрального разрешения в широких пределах), отличается простой конструкцией и достаточно протяженным полем изображения, однако из-за малого размера входной апертуры имеет ограниченное светопропускание. По сравнению с ним монохроматор изображения с вычитанием дисперсии обладает большим светопропусканием, позволяет обеспечить более высокое спектральное разрешение, однако выделяемая центральная длина волны в значительных пределах изменяется по полю изображения. В то же время эта особенность не является ограничением при условии регистрации полного куба данных $I(x, y, \lambda)$. Расчетные и полученные при моделировании характеристики дают возможность сделать вывод о перспективности обоих подходов для приложений мультиспектрального анализа.

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.
2. Govender, M. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies / M. Govender, K. Chetty, H. Bulcock // *Water S. A.* – 2007. – Vol. 33. – P. 145–151.
3. 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.
4. Herold, M. Multispectral Satellites – Imaging Spectrometry – LIDAR: Spatial-Spectral Tradeoffs in

Urban Mapping / M. Herold, D.A. Roberts // *International Journ. of Geoinform.* – 2006. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–13.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Hyperspectral cytometry at the single-cell level using a 32-channel photodetector / G. Grégori [et al.] // *Cytometry Part A*. – 2012. – Vol. 81, no. 1. – P. 35–44.

9. Accuracy of in vivo multimodal optical imaging for detection of oral neoplasia / M.C. Pierce [et al.] // *Cancer Prevention Research*. – 2012. – Vol. 5, no. 6. – P. 801–809.

10. Chin, J.A. Evaluation of hyperspectral technology for assessing the presence and severity of peripheral artery disease / J.A. Chin, E.C. Wang, M.R. Kibbe // *Journ. of Vascular Surgery*. – 2011. – Vol. 54, no. 6. – P. 1679–1688.

11. On-orbit performance of the Landsat 8 Operational Land Imager / E. Micijevic [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2014. – Vol. 9218. – P. 921816-1–921816-12.

12. Liang, H. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation / H. Liang // *Applied Physics A*. – 2012. – Vol. 106, no. 2. – P. 309–323.

13. 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.

14. Improving the performance of acousto-optic tunable filters in imaging applications / J. Vila-Francés [et al.] // *Journ. Electronic Imaging*. – 2010. – Vol. 19, no. 4. – P. 043022-1–043022-9.

15. Characterization of a double monochromator / L. Ding [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2010. – Vol. 7826. – P. 782624-1–782624-10.

16. Гулис, И.М. Двойной монохроматор изображения с вычитанием дисперсии / И.М. Гулис, А.Г. Купреев, А.Г. Костюкевич // *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. – 2011. – № 2. – С. 19–23.

17. Гулис, И.М. Спектральная селекция в монохроматоре изображения с вычитанием дисперсии / И.М. Гулис, А.Г. Купреев // *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. Физика. Математика. Информатика*. – 2014. – № 3. – С. 3–7.

18. Gulis, I.M. Low-Aberration Imaging Monochromator with Dispersion Subtraction Based on an Axially Symmetric Design / I.M. Gulis, A.G. Kupreyeu // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2015. – Vol. 82, no. 1. – P. 131–136.

19. High-performance hyperspectral imaging using virtual slit optics / B.B. Behr [et al.] // *Proc. SPIE*. – 2013. – Vol. 8726. – P. 872604-1–872604-11.

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:** org/10.1093/jpe/rtm005
2. Govender M., Chetty K., Bulcock H. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA*, 2007, vol. 33, pp. 145–151. **doi:** org/10.4314/wsa.v33i2.49049
3. 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:** org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.001
4. Herold M., Roberts D.A. Multispectral Satellites – Imaging Spectrometry – LIDAR: Spatial-Spectral Tradeoffs in Urban Mapping. *International Journal of Geoinformatics*, 2006, vol. 2, no. 1, pp. 1–13.
5. 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:** org/10.5194/amt-8-4383-2015
6. Kuula J., Pölönen I., Puupponen H.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:** org/10.1117/12.918555
7. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 010901-1–010901-23. **doi:** org/10.1117/1.JBO.19.1.010901
8. Grégori G., Patsekina V., Rajwa B., Jones J., Ragheb K., Holdman C., Robinson J.P. Hyperspectral cytometry at the single-cell level using a 32-channel photodetector. *Cytometry Part A*, 2012, vol. 81, no. 1, pp. 35–44. **doi:** org/10.1002/cyto.a.21120
9. Pierce M.C., Schwarz R.A., Bhattar V.S., Mondrik S., Williams M.D., Lee J.J., Richards-Kortum R., Gillenwater A.M. Accuracy of in vivo multimodal op-

tical imaging for detection of oral neoplasia. *Cancer Prevention Research*, 2012, vol. 5, no. 6, pp. 801–809. **doi:** org/10.1158/1940-6207.CAPR-11-0555

10. Chin J.A., Wang E.C., Kibbe M.R. Evaluation of hyperspectral technology for assessing the presence and severity of peripheral artery disease. *Journal of Vascular Surgery*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 1679–1688. **doi:** org/10.1016/j.jvs.2011.06.022

11. Micijevic E., Vanderwerff K., Scaramuzza P., Morfitt R.A., Barsi J.A., Levy R. On-orbit performance of the Landsat 8 Operational Land Imager. *Proceedings SPIE*, 2014, vol. 9218, pp. 921816-1–921816-12. **doi:** org/10.1117/12.2063338

12. Liang H. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. *Applied Physics A*, 2012, vol. 106, no. 2, pp. 309–323. **doi:** org/10.1007/s00339-011-6689-1

13. Hagen N., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies. *Optical Engineering*, 2013, vol. 52, no. 9, pp. 090901-1–090901-23. **doi:** org/10.1117/1.OE.52.9.090901

14. Vila-Francés J., Calpe-Maravilla J., Gómez-Chova L., Amorós-López J. Improving the performance of acousto-optic tunable filters in imaging applications. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, vol. 19, no. 4, pp. 043022-1–043022-9. **doi:** org/10.1117/1.3518139

15. Ding L., Cooper J.W., Kowalewski M.G., Smith G.R., Butler J.J. Characterization of a double monochromator. *Proceedings SPIE*, 2010, vol. 7826, pp. 782624-1–782624-10. **doi:** org/10.1117/12.865091

16. Gulis I.M., Kupreyeu A.G., Kostukevich A.G. [Double image monochromator with dispersion subtraction]. *Vestnik BGU. Series I*, 2011, no. 2, pp. 19–23 (in Russian).

17. Gulis I.M., Kupreyeu A.G. [Spectral selection in image monochromator with dispersion subtraction]. *Vestnik BGU. Series I*, 2014, no. 3, pp. 3–7 (in Russian).

18. Gulis I.M., Kupreyeu A.G. Low-Aberration Imaging Monochromator with Dispersion Subtraction Based on an Axially Symmetric Design. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 1, pp. 131–136. **doi:** org/10.1007/s10812-015-0075-2

19. Behr B.B., Meade J.T., Hajian A.R., Cenko A.T. High-performance hyperspectral imaging using virtual slit optics. *Proceedings SPIE*, 2013, vol. 8726, pp. 872604-1–872604-11. **doi:** org/10.1117/12.2016011

УДК 51-73

Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2

Реутская О.Г.¹, Таратын И.А.², Плескачевский Ю.М.^{1,3}

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

²Минский НИИ радиоматериалов,
ул. Кижеватова, 86, 220024, г. Минск, Беларусь

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова, 32А, 246050, г. Гомель, Беларусь

Поступила 17.06.2016

Принята к печати 10.11.2016

Изготовление модуля химических сенсоров на одном кристалле является одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики. Целью данной работы являлась разработка мультисенсорной микросистемы для уменьшения времени измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 , а также снижение потребляемой мощности микросистемы в целом.

Мультисенсорная микросистема включает четыре одиночных сенсора, размещенных на одной подложке из наноструктурированного оксида алюминия. Использование в топологии микросистемы сквозных отверстий и диэлектрической подложки снизило потребляемую мощность газовой микросистемы. Нами предложен способ измерения чувствительности четырехсенсорной микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 . Полный цикл измерения концентрации газов состоял из времени предварительного прогрева всех сенсоров микросистемы (5 с), времени разогрева каждого из сенсоров последовательно (5 с) и времени измерения сопротивления каждого сенсора (80 с).

Результаты измерений показали, что время реакции мультисенсорной микросистемы при воздействии газов: H_2 с концентрацией 0,001 %, CO_2 – 1 %, CO – 0,02 %, C_3H_8 – 0,01 % не превышает установленного для полного цикла измерения 90 с. Значение чувствительности при потребляемой мощности < 150 мВт составило для H_2 – 48–64 %, для CO_2 – 32–36 %, для CO – 20–29 %, для C_3H_8 – 68–78 %.

Предложен способ контроля чувствительности мультисенсорной микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 , который позволяет проводить измерения за 90 с. В то время как цикл измерения одиночным сенсором в среднем составляет, в режиме импульсного нагрева – 2 мин, в режиме постоянного нагрева – 5 мин. Максимальное значение потребляемой мощности микросистемы составило не более 150 мВт. С помощью микросистем можно проводить измерения более низких концентраций детектируемых газов.

Ключевые слова: мультисенсорная газовая микросистема, способ измерения, чувствительность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.
Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 .
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

For citation:

Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M.
[Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂

Reutskaya O.G.¹, Taratyn I.A.², Pleskachevsky Y.M.^{1,3}

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²Minsk Research Institute of Radiomaterials,
Kizhevatov str., 86, 220024, Minsk, Belarus

³V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus,
Kirov str., 32A, 246050, Gomel, Belarus

Received 17.06.2016

Accepted for publication 10.11.2016

Abstract

Manufacture of module of chemical sensors on a single chip is one of the promising directions in the development of gas sensory. The aim of this work was development of construction of multisensor microsystem enabled to retain the characteristics of a single sensor and its dimensions and, at the same time, to reduce power consumption and cycle time of measuring concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂ in the environment.

Multisensor microsystem consists of four detached sensors placed on a single substrate of nanostructured aluminum oxide. The use of through-holes and the dielectric substrate itself in microsystem topology reduced power consumption of gas microsystems. We have devised a method of measuring sensitivity of foursensor microsystem to the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂. A full cycle of measuring gases concentration consisted of the time required for preliminary heating of all sensors of the microsystem (5 s), the heating time of each of the sensors sequentially (5 s) and time required to measure resistance for each sensor (80 s).

The measured results show that the reaction time of multisensor microsystem when exposed to gases – H₂ at a concentration of 0,001 %, CO₂ – 1 %, CO – 0,02 %, C₃H₈ – 0,01 % does not exceed 90 s for full measurement cycle. Sensitivity value at power consumption of < 150 mW makes up 48–64 % for H₂, 32–36 % for CO₂, 20–29 % for CO, 68–78 % for C₃H₈.

The proposed method to control sensitivity of multisensor microsystem to the concentration of gases CO, H₂, C₃H₈, CO₂ allows performing measurements within 90 s while the measurement cycle by a single sensor in pulse heating mode is 2 min, in continuous heat mode – 5 min. Maximum power consumption of the microsystem does not exceed 150 mW. Microsystems allow measuring lower concentrations of detected gases.

Keywords: multisensor gas microsystem, measurement method, sensitivity.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Адрес для переписки:

Реутская О.Г.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Address for correspondence:

Reutskaya O.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: oreutskaya@gmail.com

Для цитирования:

Реутская О.Г., Таратын И.А., Плескачевский Ю.М.
Мультисенсорная микросистема для измерения концентрации газов
CO, H₂, C₃H₈, CO₂.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

For citation:

Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Pleskachevsky Y.M.
[Multisensor microsystem for measuring the concentration of gases CO,
H₂, C₃H₈, CO₂].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-271-278

Введение

В основной номенклатуре газовых сенсоров выделяют полупроводниковые сенсоры, которые работают в режимах постоянного и импульсного нагревов. Потребляемая мощность в режиме постоянного нагрева составляет от 280 до 650 мВт в среднем, а в режиме импульсного нагрева – ≤ 55 мВт. Данные значения приведены для одиночных сенсоров [1]. Принцип действия полупроводниковых сенсоров основан на изменении проводимости газочувствительного слоя при хемосорбции на его поверхности анализируемых газов [2]. В качестве чувствительных полупроводниковых слоев используют мелкодисперсные нанокристаллические оксиды металлов (SnO_2 , ZnO , In_2O_3 и др.) с легирующими добавками Pt , Pd и др. [3–5]. Благодаря структурной пористости формируемых материалов, достигаемой с помощью некоторых технологических приемов, их удельная поверхность составляет около $30 \text{ м}^2/\text{г}$. Нагревателем служит резистивный слой, выполненный из инертных материалов (Pt , RuO_2 , Au и др.) и электрически изолированный от полупроводникового слоя [4, 5]. Для обеспечения быстрого действия протекающих на поверхности чувствительного слоя физико-химических процессов на уровне нескольких секунд сенсор периодически разогревается до температуры $450\text{--}500^\circ\text{C}$ [1, 4]. В результате этого сопротивление сенсора восстанавливается до начального значения. При отжиге происходит активное освобождение поверхностных слоев полупроводника от сорбированных «отравляющих» газовых компонент [6, 7]. Время измерения концентрации газов одиночным сенсором составляет приблизительно 5 мин в режиме постоянного нагрева и 2 мин – в режиме импульсного нагрева [1, 5].

Контроль химического состава воздуха, резко изменяющегося из-за термического разложения перегретых или начинающих тлеть горючих материалов, позволяет обнаружить очаг пожара еще до появления пламени [8]. Диапазон концентраций газов, которые выделяются до момента появления пламени, составляет для CO – $0,02\text{--}0,08\%$, для H_2 – $0,001\text{--}0,01\%$, для C_3H_8 – $1\text{--}1,5\%$, для CO_2 – $0,01\text{--}0,02\%$ [8, 9].

Изготовление модуля химических сенсоров на одном кристалле представляется одним из перспективных направлений в развитии газовой сенсорики [10]. Использование в качестве чув-

ствительного элемента мультисенсорной микросистемы дает возможность, сохраняя характеристики одиночного сенсора и его габаритные размеры, уменьшить потребляемую мощность и сократить время цикла измерения при воздействии концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 .

На современном этапе развитие газовых полупроводниковых сенсоров существует несколько технологий создания мультисенсорных систем. Одна из них [10] использует матрицу из 38 сенсоров, которые располагаются на поверхности чувствительной полупроводниковой пленки (разработка научно-исследовательского института г. Карлсруэ). Существенным недостатком такой системы является высокое энергопотребление. Еще одна технология [11] обеспечивает формирование на диэлектрической мембране методами объемного травления кремниевой подложки четырех химических сенсоров. Недостатками данной мультисенсорной системы являются сложность в изготовлении, нестабильное воспроизведение параметров поликремниевого нагревателя и низкий уровень рабочих температур сенсоров [11, 12].

Целью данной работы являлась разработка мультисенсорной микросистемы для уменьшения времени измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 , а также снижение потребляемой мощности микросистемы в целом.

В результате разработаны конструкция мультисенсорной газовой микросистем и способ измерения концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 , которые позволили получить потребляемую мощность < 150 мВт и время измерения < 90 с.

Конструкция мультисенсорной микросистемы

Топология мультисенсорной газовой микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия представлена на рисунке 1. Толщина платинового нагревателя (в форме мандра) составляет $0,5$ мкм. Каждый чувствительный слой сформирован на поверхности нагревателя и электродов. Платиновые электроды для снятия сигнала с полупроводникового чувствительного слоя образуют с нагревателем зазор в 7 мкм. Толщина платиновых электродов составляет $0,5$ мкм. Вокруг нагревательных элементов выполнена перфорация. Чувствительный элемент микросистемы, изготовленный на подложке

анодного оксида алюминия (пористость приблизительно равна 35 %), имеет размер $3,7 \times 3,7$ мм и толщину 50 мкм.

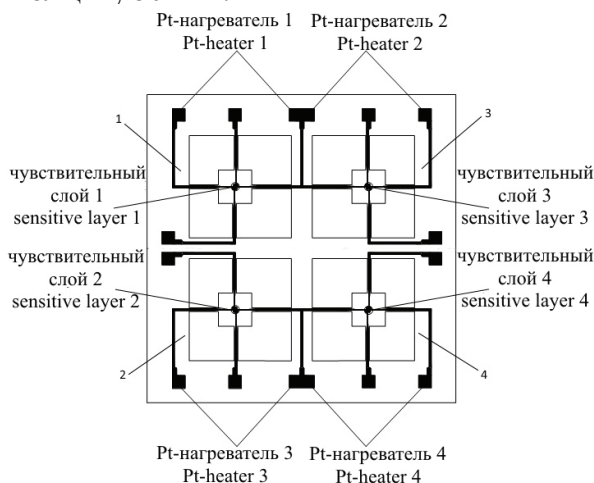


Рисунок 1 – Топология микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия: 1 – сенсор № 1; 2 – сенсор № 2; 3 – сенсор № 3; 4 – сенсор № 4

Figure 1 – Topology microsystems based on nanostructured alumina oxide: 1 – sensor № 1; 2 – sensor № 2; 3 – sensor № 3; 4 – sensor № 4

Размер площадки для нагревателя в виде меандра позволил увеличить общую площадь чувствительного слоя для каждого из сенсоров микросистемы. Формирование газочувствительных слоев, полученных золь-гель методом на поверхности чувствительных элементов микросистемы, осуществлялось послойным нанесением раствора капельным путем с толщиной слоя приблизительно 100 Å. Использование в топологии микросистемы на основе наноструктурированного оксида алюминия сквозных отверстий, как и использование самой нанопористой диэлектрической подложки, привело к снижению потребляемой мощности газовой микросистемы за счет уменьшения объема, контактирующего с нагревателем материала подложки, и уменьшения коэффициента теплопроводности подложки [13].

Измерения чувствительности микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8

Время наработки микросистемы перед началом измерений при мощности потребления 60 мВт на каждом из сенсоров в режиме постоянного нагрева, составило 240 ч.

Экспериментально было установлено, что при использовании постоянного нагрева на оди-

ночном сенсоре наблюдается «дрейф» сопротивления. Например, при токе 41 мА и мощности 67 мВт при постоянном нагреве в течение 5 ч изменение сопротивления составило 0,8 кОм (рисунок 2).

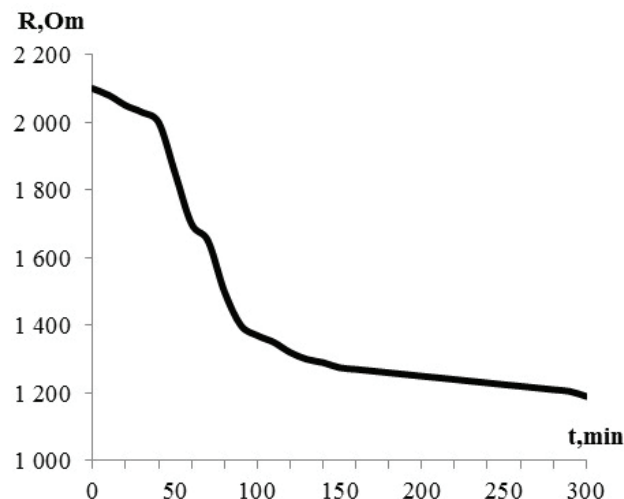


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления одиночного сенсора на подложке из наноструктурированного оксида алюминия при постоянной подаче питания в течение 5 ч (режим постоянного нагрева)

Figure 2 – The dependence of the resistance of a single sensor on the nanoporous aluminum oxide wafer at constant power up for 5 h (mode continuous heating)

Для уменьшения величины дрейфа сопротивления сенсора был использован импульсный нагрев. Сенсор периодически разогревали до температуры 450–500 °С [12]. На рисунке 3 приведены результаты измерения одиночных сенсоров на подложке из наноструктурированного оксида алюминия с разными чувствительными слоями: $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$ – для первого сенсора, $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$ – для второго.

Из экспериментальных данных установлено, что чувствительность сенсоров с предварительным отжигом выше, чем без него. Время измерения сигнала сенсора и время релаксации одиночного сенсора в режиме постоянного нагрева составляет около 5 мин, в режиме импульсного нагрева – 2 мин.

Нами предложен способ измерения чувствительности четырехсенсорной микросистемы к концентрации газов CO , H_2 , C_3H_8 , CO_2 . Для управления микросистемой разработана плата управления с микроконтроллером и разъемом для подключения интерфейсного кабеля RS 485 – RS 232 к персональному компьютеру.

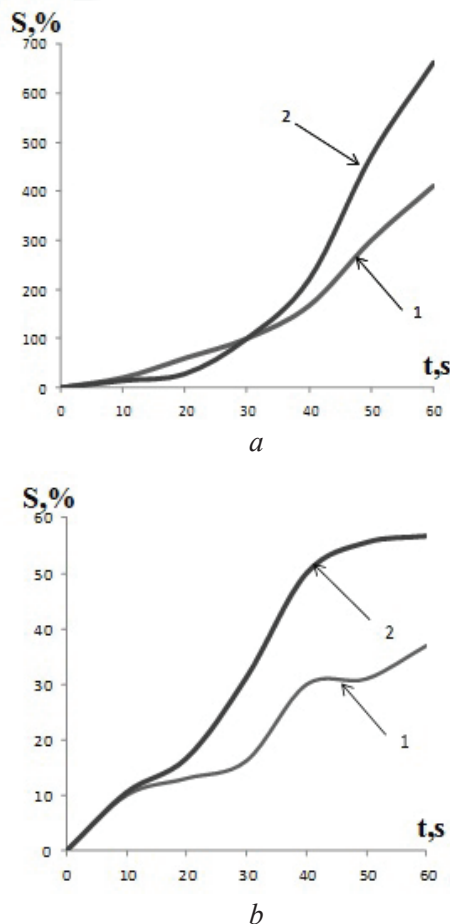


Рисунок 3 – Сенсорный отклик при воздействии CO с концентрацией 0,02 %: а – для сенсора с чувствительным слоем $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; б – для сенсора с чувствительным слоем $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$. 1 – режим постоянного нагрева; 2 – режим импульсного нагрева

Figure 3 – Touch microsystems response (sensitivity) at influence of CO with a concentration 0,02%: a – for the sensor with a sensing layer $\text{SnO}_2+\text{Pt}+\text{Pd}$; b – for the sensor with a sensing layer of $\text{In}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Pt}$. 1 – mode continuous heating; 2 – mode pulse heating

На рисунке 4 представлен цикл измерения концентрации газов, где t_n – время прогрева всех сенсоров микросистемы при первом подключении ее к источнику питания (время предпрогрева); t_{pN} – время разогрева каждого из элементов микросистемы до рабочей температуры (время разогрева); t_{mN} – время измерения сопротивления N -го сенсора микросистемы.

Номинальное значение тока, подаваемого на микросистему, соответствует 70 мА. Измерение сопротивления осуществлялось при следующих условиях:

– начальное значение тока, подаваемого на все сенсоры микросистемы одновременно – 14 мА;

– ток, подаваемый на каждый из сенсоров последовательно – 55 мА;

– время нагрева всех сенсоров микросистемы, при первом подключении ее к источнику питания (время предпрогрева) – 5 с;

– время нагрева каждого из элементов микросистемы, до рабочей температуры (время разогрева) – 5 с;

– время измерения сопротивления для каждого из сенсоров микросистемы $t_{mN} = 20$ с.

Таким образом, полный период измерения для четырех сенсоров микросистемы составляет 90 с.

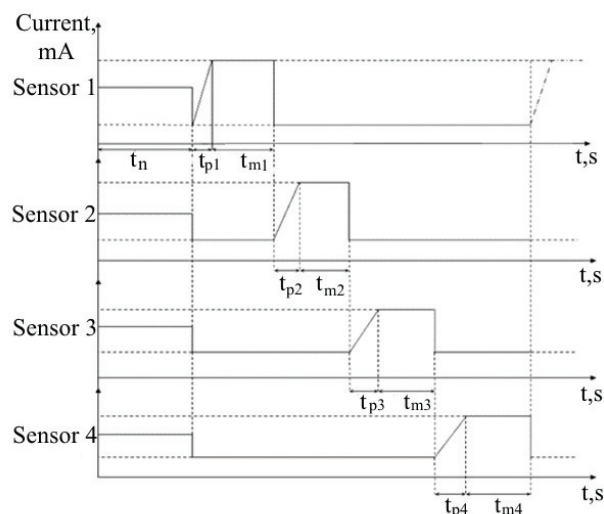


Рисунок 4 – Диаграмма измерения концентрации газов CO, H_2 , CO_2 , C_3H_8 : t_n – время предпрогрева; t_{pN} – время разогрева; t_{mN} – время измерения сопротивления N -го, где N – номер сенсора

Figure 4 – Diagram of measurement concentration of gas CO, H_2 , CO_2 , C_3H_8 : t_n – time before heating; t_{pN} – heating time; t_{mN} – time measurement of the N -sensor, where N – number of sensor

Во время предварительного прогрева микросистемы значение тока задавалось на уровне 35 мА. Предварительный прогрев происходил только один раз, непосредственно после подключения микросистемы к источнику питания. По истечении времени предварительного прогрева первый сенсор переходил в режим разогрева – его ток плавно увеличивался от значения тока холостого хода до заданного значения тока. После разогрева одного из сенсоров ток устанавливался в заданное значение. Через 5 с происходил вывод значения сопротивления сенсора на экран (период измерения сопротивления одного сенсора равен 20 с; за это время выдавались четыре значения сопротивления, последнее из которых R_r), значение среднего расчетного сопротивления сенсора за предыдущий

цикл измерения (сопротивление до подачи газа, R_0); разница между ними в процентах также выводилась на экран (чувствительность S). Затем ток данного сенсора падал до значения тока холостого хода, и программа повторяла вышеперечисленные действия со следующим сенсором. Моделирование процесса измерения проводилось в специализированной терминальной программе *Hercules*.

Во время первого цикла измерения R_0 принималось равным нулю. Сравнение значений сопротивлений сенсоров микросистемы, расчет и вывод на экран значения чувствительности происходило со второго цикла измерений. Если чувствительность превышает 15 %, то можно говорить о наличии детектируемого газа в окружающей среде [5].

Значение выходного параметра (чувствительность S) при воздействии газа рассчитывалось по формуле [5]:

$$S = \frac{|R^{80} - R_0|}{R_0} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление сенсора микросистемы без воздействия газа; R^{80} – сопротивление сенсора микросистемы при воздействии газа, через 80 с.

Полный цикл измерения концентрации газов состоял из времени предпрогрева (5 с), времени разогрева (5 с) и времени измерения сопротивления для четырех сенсоров (80 с).

Результаты измерений чувствительности микросистемы к концентрации газов

Проведены исследования трех экспериментальных образцов мультисенсорных газовых микросистем. Измерения проводились на специализированном стенде, блок-схема которого приведена на рисунке 5. Результаты измерений одного из образцов представлены в таблице.

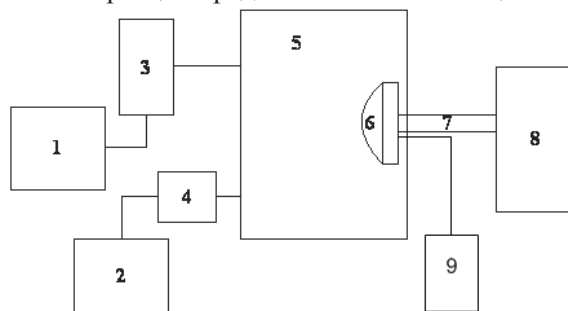


Рисунок 5 – Блок-схема стенда для измерения характеристик мультисенсорной микросистемы: 1 – баллон с одним из газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 ; 2 – баллон с искусственным воздухом; 3, 4 – ротаметр; 5 – рабочий объем с исследуемым газом; 6 – мультисенсорная микросистема; 7 – интерфейсный кабель RS 485 – RS 232; 8 – персональный компьютер; 9 – источник питания

Figure 5 – Flowchart of the bench for measuring characteristics of multi-sensor microsystem: 1 – gasbag with one of the gases CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 ; 2 – gasbag with synthetic air; 3, 4 – rotameter; 5 – working volume with the test gas; 6 – multisensor microsystem; 7 – interface cable RS 485 – RS 232; 8 – PC; 9 – power supply

Таблица

Результаты измерений мультисенсорной микросистемы The results of measurements multisensor microsystem

Параметры Characteristic	№ сенсора № sensor	Газы Gas			
		H_2	CO	CO_2	C_3H_8
		концентрации, % concentration, %			
		0,001	0,02	1	0,01
Время реакции, $\tau_{\text{ср}}$, с Reaction time, s	1	14	20	35	25
	2	14	29	32	24
	3	15	20	34	28
	4	14	22	35	25
Чувствительность N -сенсора (номер сенсора) через 80 с измерения, S^{80} при воздействии газа, % Sensitivity of the N -sensor (number of the sensor) after 80 s of measurement, when exposed to gas, %	1	60	230	36	75
	2	52	180	32	78
	3	48	240	34	68
	4	64	160	36	72

Измерения проводились при температуре окружающего воздуха $(20 \pm 5)^\circ$, относительной влажности воздуха от 10 до 90 %, атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа. Потребляемая мощность

микросистемы составила 120 мВт. Исследуемые экспериментальные образцы показали время срабатывания 14–15 с при воздействии H_2 с концентрацией 0,001 %, 32–35 с – при воз-

действию CO_2 с концентрацией 1 %, 20–29 с при воздействии CO с концентрацией 0,02 %, 24–28 с при воздействии C_3H_8 с концентрацией 0,01 % (таблица). Значение чувствительности составило для H_2 – 48–64 %, для CO_2 – 32–36 %, для CO – 20–29 %, для C_3H_8 – 68–78 %.

Результаты измерений показали, что время реакции мультисенсорной микросистемы при воздействии концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 не превышает установленных для полного цикла измерения 90 с. Значение чувствительности для данных газов более 15 % при потребляемой мощности менее 150 мВт. Следовательно, с помощью микросистем можно проводить измерения более низких концентраций детектируемых газов.

Заключение

Разработана конструкция мультисенсорной микросистемы и предложен способ контроля чувствительности к концентрации газов CO , H_2 , CO_2 , C_3H_8 , который позволяет проводить измерения за 90 с. В то время как цикл измерения одиночным сенсором в среднем составляет: в режиме импульсного нагрева – 2 мин, в режиме постоянного нагрева – 5 мин. Потребляемая мощность микросистемы при работе четырех сенсоров не превышает 150 мВт при чувствительности более 15 %.

Благодарности

Работа финансировалась в рамках задания 1.40 «Разработка типовой архитектуры системы противопожарной безопасности на основе газового пожарного извещателя с матричным сенсором» программы Союзного государства «Микросистемотехника».

Список использованных источников

1. Романова, И. Высокочувствительные датчики газа. Новинки от Figaro Engineering / И. Романова // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 1. – С. 64–70.
2. Morrison, S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors / S.R. Morrison // Sensor & Actuator. – 1997. – No. 12. – P. 425–440.
3. Yamazoe, N. Toward innovations of gas sensor technology / N. Yamazoe // Sensors and Actuators B. – 2005. – Vol. 108. – P. 2–14.
4. Szychowska, A. Investigation of CO oxidation by NO with application of semiconductor gas sensors /

A. Szychowska [et al.] // Polish J. of Environ. Stud. – 2008. – Vol. 17, no. 3. – P. 421–425.

5. Румянцева, М.Н. Влияние микроструктуры полупроводниковых сенсорных материалов на хемосорбцию кислорода на их поверхности / М.Н. Румянцева, Е.А. Макеева, А.М. Гаськов // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LI, № 2. – С. 122–129.

6. Васильев, А. Газовые сенсоры для пожарных извещателей / А. Васильев, И. Олихов, А. Соколов // Электроника: НТБ. – 2005. – № 2. – С. 24–27.

7. Покаташкин, В.И. Применение тонкопленочных полупроводниковых газовых NiO -сенсоров в озонметрии / В.И. Покаташкин [и др.] // Вестник БГУ. – Сер. 1. – 2008. – № 2. – С. 38–42.

8. Фёдоров, А.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара / А.В. Фёдоров [и др.] : монография. – М. : Академия ГПС МЧС России. – 2009. – 158 с.

9. Елисеев, М.А. Бизнес и безопасность. Системы сверхраннего обнаружения пожара / М.А. Елисеев // Системы безопасности. – 2003. – № 2 (50). – С. 145–148.

10. Кнеллер, В.Ю. Датчики для контроля окружающей среды: потребности, технологии, рынок / В.Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – № 8. – 2005. – С. 54–69.

11. Stankova, M. Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO_3 microhotplate gas sensors / M. Stankova [et al.] // Sens. Actuators B, Chem. – 2006. – Vol. 113. – P. 241–248.

12. Реутская, О.Г. Четырехсенсорная газовая микросистема на подложке из пористого анодного оксида алюминия: конструкция, технология, моделирование / О.Г. Реутская, Е.А. Белогуров, И.А. Таратын, В.В. Хатько // Приборы и методы измерений. – 2013. – Т. 7, № 2. – С. 47–51.

13. Микросенсорная газовая система для определения концентрации газов в окружающей среде / О.Г. Реутская, И.А. Таратын, И.В. Сафрошкина: патент 20011 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) G 01N27/00/ № а 20130836; опубл. 30.04.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 109.

Acknowledgments

The work was funded in the framework of the task 1.40 «Development of a standard fire safety system architecture based on the gas-fire detector with a matrix sensor» Union State program «Microsystems».

References

1. Romanova I. [Highly sensitive gas sensors. News from Figaro Engineering] *Elektronika. Nauka. Tekhnologiya. Biznes* [Electronics. Science. Technology. Business], 2011, no. 1, pp. 64–70 (in Russian).

2. Morrison S.R. Selectivity in semiconductor gas sensors. *Sensor & Actuator*, 1997, no. 12, pp. 425–440. **doi:** 10.5194/jsss-3-213-2014

3. Yamazoe N. Toward innovations of gas sensor technology. *Sensors and Actuators*, 2005, vol. 108, pp. 2–14. **doi:** 10.1016/j.snb.2004.12.075

4. Szychowska A., Wrobel-Jedrzejewska M., Chylak I., Kocemba I., Rynkowski J. Investigation of CO oxidation by NO with application of semiconductor gas sensors. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 421–425.

5. Rumyantseva M.N., Makeeva E.A., Gaskov A.M. [Influence of microstructure of semiconductor sensor materials on the chemisorption of oxygen on their surface]. *Zhurnal Rossijskogo chimicheskogo obschestva imeni D.I. Mendeleeva* [Journal of Russian D.I. Mendeleev chemical society], 2008, vol. LII, no. 2, pp. 122–129 (in Russian).

6. Vasiliev A., Oligov I., Sokolov A. [Gas sensors for fire detectors]. *ELECTRONICA NTB* [Electronics NTL], 2005, no. 2, pp. 24–27 (in Russian).

7. Pokatashkin V.I. [The use of thin film semiconductor gas of NiO-sensors to ozonometry]. *Vestnik BGU* [Messenger BSU], 2008, vol. 1, no. 2, pp. 38–42 (in Russian).

8. Fedorov A.V., Chlenov A. N., Lukjanenko A.A., Bucinskaya T.A., Demexin F.V. *Sistemy i tehnikicheskiye*

sredstva rannego obnaruzheniya pozhara [Systems and means of early fire detection]. Moscow, Academy of FMS MOE Russia Puubl., 2009, 158 p.

9. Eliseev M.A. [Business and security. Systems of early detection of fire]. *Sistemy bezopasnosti* [Security Systems], 2003, vol. 2, no. 50, pp. 145–148 (in Russian).

10. Kneller V.U. [Sensors for environmental monitoring: needs, technology, market]. *Sensors and Systems*, 2005, no. 8, pp. 54–69 (in Russian).

11. Stankova M., Vilanova X., Calderer J., Llobet E., Brezmes J. Sensitivity and selectivity improvement of rf sputtered WO₃ microhotplate gas sensors. *Sens. Actuators B, Chem.*, 2006, vol. 113, pp. 241–248.

doi: 10.1016/j.snb.2005.02.056

12. Reutskaya O.G., Belahurau Ya.A., Taratyn I.A., Khatko V.V. [Four sensor gas microsystem based on porous anodic alumina substrate: design, fabrication technology, simulation]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2013, vol. 7, no. 2, pp. 47–51 (in Russian).

13. Reutskaya O.G., Taratyn I.A., Safroshkina I.V. *Microsensornaya gazovaya sistema dlya opredeleniya koncentracii gazov v okruzhayushej srede* [Multisensor gas microsystem for determining the concentration of gases in the environment]. Patent RB, № a20130836, 2016.

УДК 53.08: 004

Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости»

Комаров Ф.Ф.¹, Пилько В.В.¹, Кулешов В.Н.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 29.03.2016

Принята к печати 25.10.2016

Переход точного машиностроения и приборостроения к широкому использованию наноразмерных структур и тонких слоев требует повышения локальности методов измерения по глубине материала. Унифицированные и общепризнанные стандарты методов измерения износостойкости и коэффициента трения слоистых структур и поверхностно-упрочненных материалов в настоящее время отсутствуют. Целью работы являлось создание универсальной машины трения, отличающейся максимально упрощенными требованиями к подготовке и геометрической форме образцов.

Важным требованием, предъявляемым к установке и методу измерения, является возможность измерения коэффициента трения и определения стойкости к износу покрытий и упрочненных слоев микронной и субмикронной толщины. Вторым важным требованием является воспроизведение в эксперименте ациклического процесса трения, максимально приближенного к реальным условиям эксплуатации узлов и деталей. Оба эти условия успешно реализуются при использовании метода «диск на плоскости». Использование метода «диск на плоскости» ведет к упрощению и повышению экспрессности измерений, минимизации используемых нагрузок на узел трения, снижению температуры трибопары, увеличению чувствительности и улучшению термостабилизации тензомоста.

Разработана, изготовлена и апробирована установка для исследования процессов трения и износа различных пар материалов в условиях, близких к эксплуатационным. Апробирована конструкция измерительной консоли с низкой величиной паразитных нагрузок на тензодатчики. Создан компьютеризированный программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров процесса трения. Разработано программное обеспечение для обработки и хранения результатов эксперимента. Программное обеспечение совместимо с современными операционными системами *Windows*. Формат файлов для хранения результатов измерения коэффициента трения совместим с основными графическими редакторами и допускает математическую обработку средствами *Excel*. Последовательно изложены основные принципы анализа и обработки результатов. Приведены типичные результаты использования разработанной машины трения для измерения коэффициента трения и определения стойкости к износу массивных, однородных и поверхностно упрочненных материалов и сплавов с покрытиями.

Показана высокая эффективность созданного комплекса оборудования при исследовании и оптимизации процессов нанесения покрытий и модификации поверхностных слоев. Работоспособность комплекса подтверждена при исследовании модифицированных слоев и покрытий микронной толщины. Установлено, что коэффициент трения и износостойкость конструкционных материалов, тонких микрокристаллических упрочняющих покрытий и наноструктурированных слоев эффективно контролируется с помощью созданного комплекса.

Ключевые слова: измерительный комплекс, коэффициент трения, износостойкость.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Адрес для переписки:

Пилько В.В.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru

Address for correspondence:

Pilko V.V.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University, Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: pilkow@mail.ru

Для цитирования:

Комаров Ф.Ф., Пилько В.В., Кулешов В.Н.
Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости».
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 279–285.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

For citation:

Komarov F.F., Pilko V.V., Kuleshov V.N.
[Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method

Komarov F.F.¹, Pilko V.V.¹, Kuleshov V.N.²

¹A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus

²Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus

Received 29.03.2016

Accepted for publication 25.10.2016

Abstract

Transition of the precision engineering and instrumentation to the widespread use of nanoscale structures and thin layers requires improved localization methods for measuring the depth of the material. Unified standards and the generally accepted methods for measuring the wear resistance and friction coefficient are not currently available. The aim of this work was the development of a universal friction machine with the simplified requirements for the preparation and the geometric shape of the sample and the opposing disc.

An important requirement for the equipment and the method of measurement is the ability to measure the friction coefficient and the determination of the wear resistance of coatings and hardened layers of micron and submicron thicknesses. Another important requirement is modeling in the experiment of acyclic friction process, as close as possible to the real operating conditions of components and parts. Both of these conditions are successfully realized by using the method of «disc on plate». Implementation of «disk on plate» method was used to simplify and improve the rapid measurement, and to minimize load on the friction assembly, reduce friction pair temperature, increase the sensitivity and improve the resistive bridge thermal stabilization.

The complex for the study of friction and wear processes of various materials pairs in conditions close to operational was manufactured and tested. The measuring console with a low value of the parasitic load on the measuring cell was designed. A computerized hardware and software system for the registration of the friction parameters of the process was developed. The software for processing and storage of experiment results was developed. The software is compatible with modern Windows operating systems. The file format for measurement results storage is compatible with the conventional graphic editors and could be processed by means of Excel. The main principles of the analysis and processing of the results are consequentially described. Typical results of usage of the developed machine for friction coefficient measurements and the determination of the wear resistance of massive, homogeneous surface- hardened materials and alloys with coatings are shown.

The high efficiency of the created equipment complex during investigation of coatings, optimization of coating depositing processes and the modification of the surface layers are shown in the study. The efficiency of the complex was confirmed by the study of the modified layers and micron thickness coatings. It was found that the friction coefficient and wear resistance of construction materials, modified thin microcrystalline layers and nanostructured coatings was effectively controlled by using of the created complex.

Keywords: measurement complex, friction coefficient, wear resistance.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Адрес для переписки:

Пилько В.В.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru

Address for correspondence:

Pilko V.V.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University, Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: pilkow@mail.ru

Для цитирования:

Комаров Ф.Ф., Пилько В.В., Кулешов В.Н.
Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов
трения и износа методом «диск на плоскости».
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 279–285.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

For citation:

Komarov F.F., Pilko V.V., Kuleshov V.N.
[Hardware and software complex for friction and wear investigations
by the «disc on plate» method].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Введение

Актуальной задачей точного машиностроения является сбережение энергии и ресурсов. Как одно из перспективных направлений решения задачи зарекомендовало себя использование новых материалов [1], материалов с модифицированным поверхностным слоем [2] либо с нанесенным на поверхность покрытием [3]. Вследствие многофакторности процессов обработки и нанесения неизбежно возникает задача их оптимизации. В большинстве случаев задача сводится к поиску экстремумов износостойкости и коэффициента трения [4, 5]. Экспрессное определение этих важных величин позволяет интенсифицировать процессы оптимизации. Наметившиеся в последнее время тенденции перехода к наноразмерным структурам и тонким слоям [6, 7] вынуждают повышать локальность методов измерения по глубине материала. Унифицированные и общепризнанные стандарты методов измерения износостойкости и коэффициента трения материалов для точного машиностроения и приборостроения в настоящее время отсутствуют. Перспективным способом решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам слоистых структур и поверхностно-упрочненных материалов и контртелу. Основными источниками новой научной информации при исследованиях служат величина коэффициента трения и диапазон ее изменения в зависимости от времени испытания.

Среди используемых в настоящее время установок для трибологических исследований прототипом разработки могут послужить машины трения [8, 9]. Обе машины корректно определяют осевую нагрузку, но обладают рядом недостатков, среди которых наиболее существенными являются:

- сложная форма образца;
- проблема корректного определения дистанции трения;
- сложность термостабилизации механического контакта.

Целью данной работы было создание трибометрического комплекса, позволяющего устранить указанные выше недостатки.

Основные результаты и их обсуждение

Установлено, что для решения поставленных задач наиболее эффективным методом исследования коэффициента трения и износостойкости

является контакт вращающегося диска (контртело) и неподвижной плоскости (образец) при сохранении неизменными основных параметров испытаний.

Метод характеризуется:

- простой формой образца;
- возможностью использования смазывающих и охлаждающих агентов;
- широким диапазоном и высокой точностью контроля нагрузки и силы трения;
- высокой эффективностью при исследовании покрытий и модифицированных слоев;
- максимальной приближенностью испытаний к реальным условиям эксплуатации;
- возможностью получения основных характеристик процессов трения и износа.

Схема разработанной экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Установка смонтирована на станине 10, снабженной виброопорами 11. Контртело в виде диска с полированным ребром изготавливают из материала, наиболее точно воспроизводящего условия эксплуатации образцов. В условиях данного эксперимента использовано контртело из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Диск 2 приводится во вращение с постоянной скоростью 0,33 оборота в секунду синхронным двигателем типа РД-09 через редуктор. Точность стабилизации скорости вращения определяется стабильностью частоты сети переменного тока, линейная скорость контртела рассчитывается исходя из его диаметра. Образец 1, предварительно отбалансированный в равновесии с помощью подвижного противовеса 7, прижимается к диску усилием калиброванного разновеса 3, размещенного точно над осью вращения 8. В процессе трения предусмотрена возможность частичного погружения диска в рабочую жидкость, служащую для смазки, удаления продуктов износа и охлаждения контртела.

При работе устройства сила трения вызывает деформации упругой стальной пластины, снабженной четырьмя тензоэлементами, два из которых подвергаются сжатию, а два – растяжению. Тензоэлементы соединены в температурно-компенсированную мостовую схему 12, одна диагональ которой запитана от высокостабильного источника напряжения. Со второй диагонали снимается электрический сигнал, пропорциональный величине силы трения в паре. Паразитный сигнал, возникающий вследствие асимметрии плеч моста, компенсируется потенциостатом.

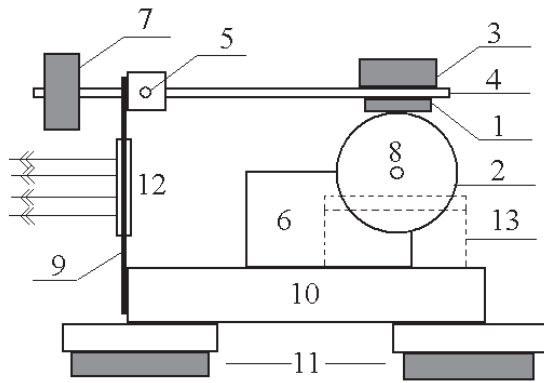


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования коэффициента трения и износоустойчивости материалов в паре «диск – плоскость»: 1 – исследуемый образец; 2 – диск; 3 – нагрузка; 4 – консоль; 5 – ось качения; 6 – двигатель с редуктором; 7 – балансир; 8 – ось вращения; 9 – упругая стальная пластина; 10 – станина; 11 – виброопоры; 12 – тензоэлементы; 13 – ванна с рабочей жидкостью (при необходимости)

Figure 1 – The assembly of the experimental circuit for the «disc – plate» pair friction coefficient and the wear resistance measurements: 1 – testing sample; 2 – disc; 3 – load; 4 – console; 5 – oscillation axis; 6 – motor with speed reducer; 7 – equalizer; 8 – rotation axis; 9 – elastic steel plate; 10 – frame; 11 – antivibration mountings; 12 – strain gauge transducers; 13 – bathtub with operating liquid (optional)

Сигнал обрабатывается в режиме реального времени АЦП – платой *ICP DAS PIO-821H*, подключенной к системной шине персонального компьютера (ПК) с установленным драйвером *PIO-821 Series Classic Driver* версии не ниже 1.0.1. Минимально рекомендуемая конфигурация ПК:

- процессор *Intel Pentium* (или совместимый);
- операционная система *Windows XP*.

Данные поступают в специально разработанную для трибологических испытаний программу регистрации напряжения «*Tribology Logger 2013 v.1.00*». Основное диалоговое окно программы выполнено стандартными средствами *Delphi* и содержит полный набор опций, свойственных обычным планшетным потенциометрам-регистраторам. Программное обеспечение производит:

- регистрацию зависимости напряжения от времени с сохранением на накопителе и отображением графика зависимости на экране ПК;
- отображение ранее сохраненных зависимостей на экране ПК, вывод их на принтер;

– экспорт зависимостей в текстовый файл.

Для калибровки тензоэлемента предусмотрена возможность приложения силы по нормали к упругой пластине с помощью калиброванных разновесов. Время испытаний фиксируется системным таймером и выдерживается постоянным для всех образцов. Дистанция трения при необходимости определяется расчетным путем, исходя из диаметра используемого контртела. По истечении времени испытаний производится определение геометрических размеров трека износа оптическими методами и определяется величина объемного износа. При необходимости данные текстового файла с учетом результатов калибровки могут быть обработаны программными продуктами типа *Origin* и позволяют определить интегральное значение работы сил трения. Основные параметры и условия испытаний:

- толщина исследуемого слоя 1–10 мкм;
- толщина образца не менее 3 мм;
- диаметр контртела 30–60 мм;
- точность контроля величины коэффициента трения $\pm 0,02$;
- точность контроля дистанции трения $\pm 1\%$;
- величина осевой нагрузки $0,05\text{--}1,00 \pm 0,01\text{ Н}$;
- скорость вращения $0,33 \pm 0,03$ оборотов в секунду;
- интегральная температура пары трения $20\text{--}78\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- линейная скорость контртела $0,03\text{--}0,06\text{ м/с}$.

Апробация методики осуществлена в ряде разноплановых экспериментов, отдельные типичные результаты приводятся ниже.

При оптимизации параметров процесса нанесения слоев триботехнического назначения проводились измерения коэффициента трения нержавеющей стали с покрытием из модифицированного наноструктурирующими компонентами нитрида титана. Типичный результат измерений коэффициента трения представлен на рисунке 2.

Уместно заметить, что высокое значение коэффициента трения может быть обусловлено в ряде случаев интенсивным износом контртела и не является критичным, к примеру, для покрытий режущего инструмента при черновой обработке.

После регистрации временной зависимости коэффициента трения возникший трек износа может быть исследован оптическими методами и путем профилометрии. Ниже приводится пример

сравнительных испытаний на стойкость к износу образцов двух типов нержавеющей стали.

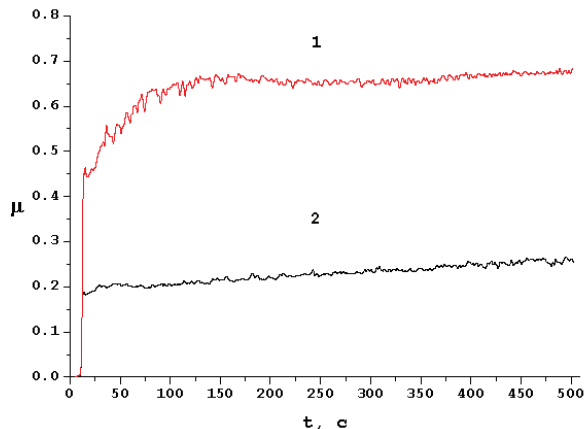


Рисунок 2 – Коэффициент трения в зависимости от времени испытаний образцов нержавеющей стали 12X18H9T с покрытиями из модифицированного нитрида титана: 1 – покрытие до оптимизации; 2 – покрытие, нанесенное в оптимизированных режимах

Figure 2 – Friction coefficient vs testing time for stainless steel 12X18H9T samples coated by modified titanium nitride: 1 – coating before optimization; 2 – coating deposited in optimized conditions

Типичные пятна контакта, возникающие в результате измерений коэффициента трения при дистанции скольжения $D = 100$ м, представлены на рисунке 3. Количественные характеристики стойкости материала к износу далее могут быть получены расчетным путем. В качестве критерия износостойкости можно использовать длину трека L , глубину лунки h , ее объем V и удельные значения, рассчитанные на единицу дистанции скольжения трибопары либо на единицу мощности.

Пренебрегая деформацией образца под давлением диска с радиусом R , можно записать уравнение связи:

$$h = R - (R^2 - L^2/4)^{1/2}.$$

Таким образом, при экспрессных испытаниях можно избежать процедуры профилометрирования трека и оперировать значением линейного износа h . В используемой геометрии несложно также получить выражение для площади максимального сечения трека износа:

$$S = R^2 \arcsin(L/2R) - L(R - h)/2.$$

И, наконец, из рисунка 3а видно, что с высокой степенью точности центральная часть трека шириной W (на уровне 100 мкм) может быть аппроксимирована цилиндром с объемом $V = SW$ и

несет информацию об объемном износе слоя. В данном случае переход к объемной модели расчета позволяет сравнивать результаты экспериментов методики «диск на плоскости» [10] с данными, полученными методами [8] и [9].

Пример расчетных значений для геометрических параметров рисунка 3 представлен в таблице. Значения работы сил трения для треков a и b , полученные путем интегрирования соответствующих трибограмм, по характеру близких к представленным на рисунке 2, составляли 14,2 Дж и 4,0 Дж соответственно. Износостойкость рассчитывается как значение, обратное интенсивности изнашивания.

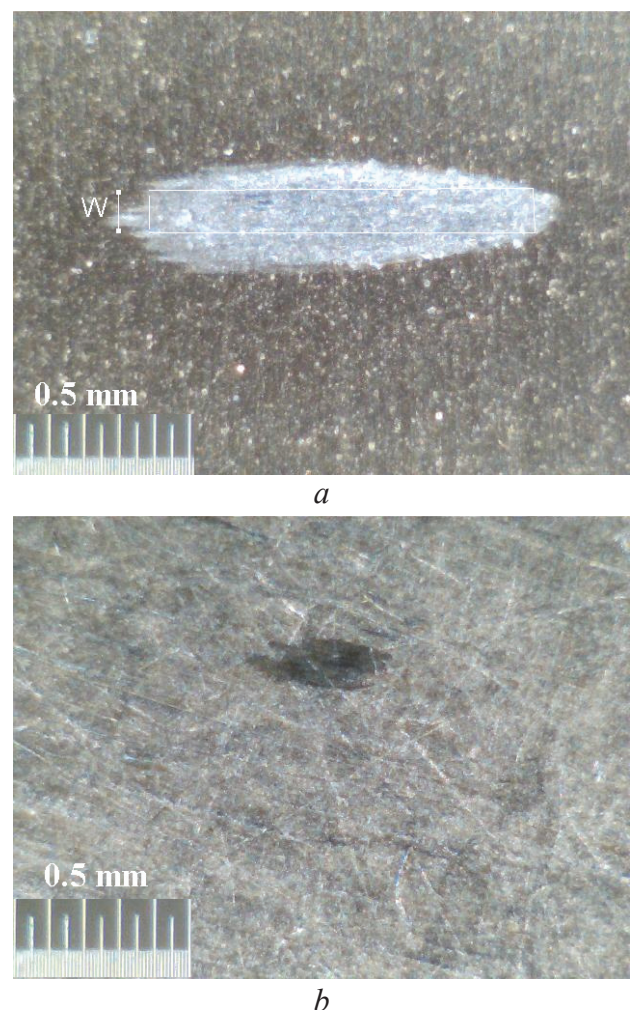


Рисунок 3 – Микрофотографии треков износа, полученных в тождественных условиях испытаний, дистанция скольжения 100 м: a – образца нержавеющей стали 12X18H9T; b – сталь 316L (03X17H14M3) с термообработкой

Figure 3 – Pictures of wear tracks obtained in same experimental conditions, sliding distance 100 meters: a – stainless steel 12X18H9T sample; b – 316L (03X17H14M3) steel after heat treatment

Таблица / Table

Экспериментальные и расчетные значения трибологических параметров
Measured and calculated tribological parameters

Марка сплава Alloy	12X18H9T	03X17H14M3
Длина трека, мкм Track length, μm	1200	290
Расчетная глубина трека, мкм Calculated track depth, μm	12,86	0,76
Интенсивность изнашивания, мкм/м Wear intensity, $\mu\text{m}/\text{m}$	0,129	0,0076
Интенсивность изнашивания, мкм/Дж Wear intensity, $\mu\text{m}/\text{J}$	0,91	0,19
Износостойкость, м/мкм Wear resistance, $\text{m}/\mu\text{m}$	7,75	131,6

Заключение

Разработано устройство для исследования коэффициента трения антифрикционных и упрочненных слоев. Создан макет устройства. Создан компьютеризированный программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров процесса трения, разработано программное обеспечение для регистрации, обработки и хранения результатов эксперимента. Устройство отличается простой формой образца, широким диапазоном и высокой точностью контроля нагрузки и силы трения, высокой эффективностью при исследовании покрытий и модифицированных слоев.

Работоспособность комплекса подтверждена при исследовании модифицированных слоев и покрытий микронной толщины. Установлено, что коэффициент трения и износостойкость конструкционных материалов, тонких микрокристаллических упрочняющих покрытий и наноструктурированных слоев эффективно контролируется методом исследований процессов трения в паре «диск – плоскость».

Список использованных источников

1. *Kenzari, S.* Complex metallic alloys as new materials for additive manufacturing / S. Kenzari, D. Bonina, J.M. Dubois, V. Fournée // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2014. – Vol. 15. – P. 1–9.
2. *Totten, G.E.* Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering / G.E. Totten, H. Liang. – Marcel Dekker Inc. New York – Basel, 2004. – 940 p. ISBN 0-203-02154-10-203-02154-1 Master e-book ISBN.
3. *Voyevodin, A.A.* Recent Advances in Hard, Tough, and Low Friction Nanocomposite Coatings / A.A. Voyevo-

din, J.S. Zabinski, C. Muratore // *Tsinghua Science & Technology.* – 2005. – Vol. 10, no. 6. – P. 665–679.

4. *Rylyakin, E.G.* Research of Hydrounits Details Wear Resistance / E.G. Rylyakin, V.I. Kostina // *Contemporary Engineering Sciences.* – 2015. – Vol. 8, no.11. – P. 477–480 (in English).

5. *Vekatesh, B.* Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art / B. Vekatesh, K. Sriker, V.S.V. Prabhakar // *Procedia Materials Science.* – 2015. – Vol. 10. – P. 527–535.

6. *Cavaleito, A.* Nanostructured Coatings / A. Cavaleito, J.T. De Hossou. – Berlin, Springer-Verlag, 2006.

7. *Komarov, F.F.* Influence of conditions employed in application of Ti–Zr–Si–N nanostructured coatings on their composition, structure, and tribomechanical properties / F.F. Komarov, V.V. Pilko, I.M. Klimovich // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2015. – Vol. 88, no. 2. – P. 358–363.

8. *Sel'kin, V.P.* Friction machine for testing materials under boundary lubrication / V.P. Sel'kin, S.V. Kopylov // *Journal of Friction and Wear.* – 2016. – Vol. 37, no. 2. – P. 184–186.

9. *Grigor'ev, A.Ya.* Reciprocating MTU–2KZ millitribometer / A.Ya. Grigor'ev [et al.] // *Journal of Friction and Wear.* – 2014. – Vol. 35, no. 6. – P. 455–459.

10. *Komarov, F.F.* Effect of He⁺ ion irradiation on structure and wear resistance of TiAlN coatings deposited by magnetron sputtering / F.F. Komarov, S.V. Konstantinov, V.V. Pilko, V.A. Kukareko // *Proceedings of 8 international conference Plasma Physics and Plasma Technology*, 14–18 September. – Minsk, 2015. – P. 297–300.

References

1. *Kenzari S., Bonina D., Dubois J.M., Fournée V.* Complex metallic alloys as new materials for additive manufacturing. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2014, vol. 15, pp. 1–9. doi: 10.1088/1468-6996/15/2/024802
2. *Totten G.E., Liang H.* Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering. Marcel Dekker Inc. New York–Basel, 2004, 940 p.
3. *Voyevodin A.A., Zabinski J.S., Muratore C.* Recent Advances in Hard, Tough, and Low Friction Nanocomposite Coatings. *Tsinghua Science & Technology*, 2005, vol. 10, no. 6, pp. 665–679. doi: 10.1016/S1007-0214(05)70135-8
4. *Rylyakin E.G., Kostina V.I.* Research of Hydrounits Details Wear Resistance. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 477–480. doi: org/10.12988/ces.2015.5257 (in English)
5. *Vekatesh B., Sriker K., Prabhakar V.S.V.* Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art. *Procedia Materials Science*, 2015, vol. 10, pp. 527–535. doi: 10.1016/j.mspro.2015.06.002
6. *Cavaleito A., De Hossou J.T.* Nanostructured Coatings. Berlin, Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/978-0-387-48756-4

7. Komarov F.F., Pilko V.V., Klimovich I.M. Influence of conditions employed in application of Ti–Zr–Si–N nanostructured coatings on their composition, structure, and tribomechanical properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 2, pp. 358–363.
doi: 10.1007/s10891-015-1200-z
8. Sel'kin V.P., Kopylov S.V. Friction machine for testing materials under boundary lubrication. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 184–186.
doi: 10.3103/S1068366616020136
9. Grigor'ev. A Ya., Gutsev D.M., Zozulya A.P., Kovaliova I.N., Kudritskii V.G., Myshkin N.K., Semenyuk M.S. Reciprocating MTU–2KZ millitribometer. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 6, pp. 455–459.
doi: 10.3103/S1068366614060063
10. Komarov F.F., Konstantinov S.V., Pilko V.V., Kukareko V.A. Effect of He⁺ ion irradiation on structure and wear resistance of TiAlN coatings deposited by magnetron sputtering. *Proceedings of 8 international conference Plasma Physics and Plasma Technology*, 14–18 September, Minsk, 2015, pp. 297–300.

УДК 620.179-534.1

Особенности обнаружения поверхностных дефектов с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн

Баев А.Р.¹, Митьковец А.И.², Костюк Д.А.³, Коновалов Г.Е.¹

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь

³Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

Поступила 15.06.2016

Принята к печати 15.11.2016

Использование импульсно-лазерного возбуждения поверхностных волн и приема их пьезоэлектрическими контактными преобразователями перспективно для обнаружения поверхностных дефектов. Цель данной работы состояла в выявлении оптимальных условий обнаружения реальных усталостных трещин микронных размеров и поверхностных пор при пересечении движущимся пятном лазерного луча дефектной области.

Объектом исследований служили металлические образцы с шириной раскрытия устья усталостных трещин от 8 до 0,5 мкм и глубиной от 400–500 мкм до приблизительно 200 мкм. Цилиндрическое отверстие диаметром 1 мм использовалось в качестве модели поры. Экспериментальная установка для исследований содержит источник импульсно-лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм и длительностью приблизительно 20 нс. На выходе лазера установлено устройство регулирования размеров пятна лазерного луча в виде длинной полосы и круга. Акустические сигналы, возбуждаемые в результате термического нагрева поверхности образца лазерным импульсом, принимались наклонным преобразователем с рабочей частотой 2,7 МГц. Далее сигнал для обработки поступал на осциллоскоп «Spectronic» TDS 3052B.

Изучены закономерности изменения амплитуды и формы импульсов акустических волн в зависимости от координаты положения и геометрии пятна лазерного луча. Установлено, что оптимальные условия выявления дефектов по амплитудному признаку имеют место при пересечении пятном лазерного луча как трещины, так и поры. В первом случае рост амплитуды сигнала составил 7–8 раз, что характерно для резонансного режима возбуждения волн. При этом отношение ширины пятна луча в виде длинной полосы к длине волны составило приблизительно 1,8–2,2 раза. Если же трещина имеет малое раскрытие (приблизительно 0,5 мкм), то наиболее информативным параметром является спектр акустического импульса или его форма – вступительная часть импульса.

Таким образом, результаты исследований позволяют предложить новые возможности повышения надежности и чувствительности выявления поверхностных дефектов путем оптимизации геометрических параметров движущегося лазерного луча.

Ключевые слова: импульсно-лазерное излучение, поверхностные волны, пьезопреобразователь, трещина, пора.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Митьковец А.И., Костюк Д.А., Коновалов Г.Е.
Особенности обнаружения поверхностных несплошностей с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

For citation:

Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Kononov G.E.
[Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 286–295 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation

Baev A.R.¹, Mitkovets A.I.², Kostiuk D.A.³, Konovalov G.E.¹

¹*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus*

²*Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk Belarus*

³*Brest State Technical University,
Moskovskaya str., 267, 224017, Brest, Belarus*

Received 15.06.2016

Accepted for publication 15.11.2016

Abstract

Laser pulse simulation of the surface waves and its receiving by contact piezoelectric probes is perspective direction to detect surface defects. The aim of this work was to determine optimal conditions for detection of the real fatigue cracks of nearly microns width and surface pores by moving depending on the position of the center of a laser beam laser beam spot.

The objects of research were metal specimens with crack's width of 8 m up to 0,5 mm and depth $\approx$ 400–500 mm up to $\approx$ 200 mm. Cylindrical hole by $\approx$ 1 mm diameter used as a model pore. An experimental installation used consisted of the pulse laser light emission source with laser wavelength of 1.06 m and laser pulse duration of $\approx$ 20 ns. An arrangement to adjust the laser beam spot geometry in the form of a long strip and a circle was applied. Surface waves were received by the 2.7 MHz frequency probe, and processed with use of a «Spectronic» TDS 3052B oscilloscope.

The laws of acoustical signal amplitude and its form changes vs. the laser beam spot geometry and its position in regard to defect were determined. We discovered that optimal conditions for flaw detection took place when the laser beam spot moving trough the defect's range – crack and pore. In the first case amplitude growth of the signal was up to 7–8 time – like as resonance conditions realized. And the ratio of the laser's beam spot width (as long strip) to wave length were $\approx$ 1.8–2.2. The more informative parameter to find crack with small width ($\approx$ 0.5mm) was the acoustical pulse spectrum or the pulse entrance part.

Thus, the further increasing of the surface flaw detection may be realized by laser simulation of the surface waves controlling the form of the moving spot of laser beam. New possibilities to increase sensitivity and reliability of ultrasonic evaluation surfaces in objects with complicated profile and fare accessible places are to be arise.

Keywords: impulse-laser radiation, surface waves, ultrasound probe, crack.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Адрес для переписки:

Баев А.Р.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Митьковец А.И., Костюк Д.А., Коновалов Г.Е.
Особенности обнаружения поверхностных несплошностей с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Address for correspondence:

Baev A.R.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

For citation:

Baev A.R., Mitkovets A.I., Kostiuk D.A., Konovalov G.E.
[Peculiarities of the surface flaw detection by elastic waves simulated by pulse-laser radiation].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 286–295 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-286-295

Введение

Возбуждение и прием упругих волн (УВ) в твердых телах с помощью лазерной техники перспективно в области неразрушающего контроля и диагностики твердых и жидких сред [1–3]. При этом возможны различные варианты использования как оптического источника генерации УВ, так и их приемника, включая комбинированные схемы прозвучивания объекта [4–8]. Высокие требования к состоянию поверхности контролируемого объекта, его геометрии, а также низкая чувствительность существенно ограничивают использование бесконтактных оптических схем приема [2], как правило, стенами лабораторий. Перспективны комбинированные методы измерений, сочетающие использование источника импульсно-лазерного излучения и приемника возбуждаемых волн преимущественно в виде электромагнитно-акустического или пьезоэлектрического (контактного) преобразователя (ПЭП).

В настоящее время наиболее простая и эффективная схема прозвучивания объектов сложного рельефа и расположенных в труднодоступных местах реализуется с помощью компактных генераторов импульсно-лазерного излучения и разнообразных конструкций (ПЭП) с наклонными призмами для приема объемных, поверхностных, пластинчатых волн [9]. Ввиду значительных трудностей при возбуждении указанных мод непосредственным воздействием импульсного лазерного луча (ЛЛ) на поверхности объекта может быть размещена твердотельная или удерживаемая магнитным полем магнитоэластичная клиновидная прослойка с углом клина β , скорость в которой C_k [7]. При этом достигается наибольший коэффициент передачи энергии излучения в объемные и пластинчатые волны согласно схеме: ЛЛ $\rightarrow$ внешняя поверхность клина, покрытая светопоглощающим слоем $\rightarrow$ граница контакта клина с объектом $\rightarrow$ материал объекта, где угол α_m – максимум оси диаграммы направленности возбуждаемой моды $\Phi(\alpha, \theta)$, определяется из закона Снеллиуса: $\alpha_m = \arcsin(C_k/C \sin \beta)$, где $C = C_{T,L,S,P}$ – скорость поперечной (Т), продольной (L), поверхностной (S) и пластинчатых (P) симметричных и ассиметричных упругих мод. Именно в этом случае наблюдается режим линейного возбуждения УВ достаточно высокой интенсивности, что весьма важно при реализации высокоточных акустических измерений. Так

что амплитуда возбуждаемых в призме колебаний $A \sim J_L < J_{0L}$, где J_L – интенсивность падающего излучения; J_{0L} – пороговое значение интенсивности, при превышении которого нарушается эта линейность. Использование в качестве материала клина магнитной жидкости, преобразующей излучение в продольные УВ позволяет управлять диаграммой направленности $F(\alpha, \theta)$ путем изменения угла ее наклона или ее кривизны, фокусируя акустический луч в объекте [10].

На первом этапе исследований рассмотрим более простую ситуацию, когда в качестве зондирующих используются поверхностные акустические волны (ПАВ), возбуждаемые при непосредственном падении ЛЛ на объект и наблюдается максимальный коэффициент оптоакустического (ОА) преобразования $K_{OA} = J_L/J_A$, где J_A – интенсивность ПАВ. Ниже проанализируем некоторые возможности выявления поверхностных дефектов путем использования ПАВ, возбуждаемых при оптоакустическом преобразовании.

Краткий анализ некоторых возможностей выявления поверхностных и подповерхностных дефектов с помощью поверхностных акустических волн, возбуждаемых лазерным излучением

Как известно [1], с помощью ПАВ представляется возможным выявлять поверхностные и подповерхностные несплошности, лежащие на глубине $h \sim \lambda_s - 2\lambda_s$, где λ_s – длина поверхностной волны. Один из возможных классических вариантов их определения иллюстрируется на рисунке 1, где источник ПАВ расположен вне зоны несплошности. В процессе перемещения пятна ЛЛ, являющегося источником поверхностной волны, по заданной траектории рассеянные дефектом импульсы акустического сигнала принимаются одним или несколькими компактными ненаправленными ПЭП. Согласно схеме (рисунок 1а), пятно ЛЛ имеет форму круглого пятна, так что из-за расхождения его амплитуда убывает с расстоянием по закону $\sim r^{0.5}$. При этом угол между осью индикатрисы рассеяния отраженного от трещины импульсного сигнала ПАВ и радиусом-вектором r , проведенным к трещине, равен $\phi = \arcsin[(nr/r]$, где n – единичный вектор нормали к плоской трещине. Таким образом, существенное ослабление сигнала из-за расхождения волны с расстоянием и особенности ее отражения от дефекта могут су-

существенно усложнить процесс измерений и снизить его производительность.

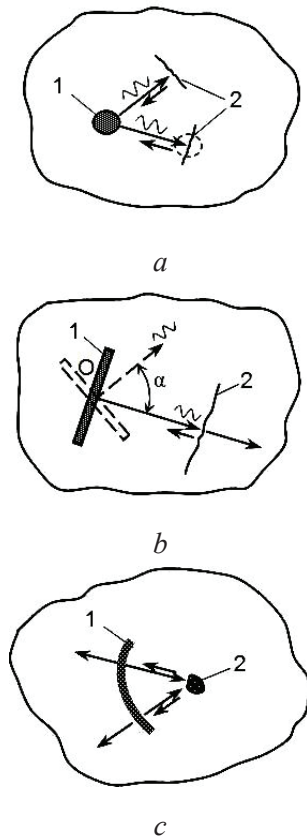


Рисунок 1 – Некоторые возможные способы возбуждения поверхностных акустических волн лазерным лучом для обнаружения поверхностных дефектов: пятно лазерного луча круглое (а), подобно длинной полосе (b), дуге (с); 1 – пятно лазерного луча; 2 – дефект

Figure 1 – Some possible ways of SAW simulation by laser beam to find defects: spot of the laser beam is round (a), like as a long stripe (b), as an arc (c); 1 – beam spot; 2 – defect

Для улучшения выявляемости поверхностных дефектов может быть использована схема возбуждения ПАВ качающимся или вращающимся лазерным лучом типа «длинная полоса», что позволяет прозвучивать контролируемую зону под различными углами и «оптимизировать» условия отражения зондирующего сигнала от трещины. Однако при этом существуют такая ориентация трещины, при которой обнаружение сигнала-отклика маловероятно. Кроме того, чувствительность к обнаружению локальных дефектов типа поры или инородного включения невысокая. Этот недостаток может быть устранен

путем придания определенной формы пятну ЛЛ, служащей в качестве источника концентрируемых (фокусируемых) волн. Как видно, это может быть реализовано, когда пятно ЛЛ сформировано в виде одной или несколько соосных дуг, имеющих радиусы R_i и толщину $d_i < 0,5\lambda_s$, величины которых выбраны из условия минимизации шумового фона, создаваемого излучаемыми в обратном направлении волнами. Изменяя положение фокуса и его положения за счет варьирования R_i и углового качания или вращения пятна ЛЛ, представляется возможным существенно повысить чувствительность и надежность выявления дефектов с низким коэффициентом отражения K_R , обусловленным малыми геометрическими размерами и ориентацией.

Основной недостаток применения указанных схем выявления трещин в теновом режиме и режиме эхо, а также и других подобных (с использованием ОА-возбуждения) заключается в том, что наличие на поверхности объекта мелких рисок (глубиной $\approx 5\text{--}10$ мкм), наличие загрязнений и пространственной неравномерности затухания ПАВ существенно затрудняют применение не только указанного метода, но и других, включая оптический, термоволновой, фотоакустический, тепловой.

Одно из перспективных направлений повышения чувствительности и надежности выявления поверхностных дефектов заключается в использовании метода, основанного на анализе зависимости параметров акустического сигнала именно при пересечении дефекта пятном ЛЛ [5]. В данном случае в качестве объекта исследований служил металлический образец с технологической прорезью шириной $d = 50$ мкм, глубиной $h \gg \lambda_s$ и параллельными стенками. При реализации измерений, поясняемых рисунком 2, пятно ЛЛ, подобное длинной полосе с поперечным размером D , перемещается вдоль координаты x .

Если пятно расположено вне зоны трещины ($D/2 < x_0 < -D/2$), то наблюдается плавное изменение амплитуды сигнала с расстоянием от центра пятна ЛЛ x_0 до координаты искусственной трещины ($x = 0$). Но если $-D/2 < x_0 < D/2$, то функция $A(w)$ при положении центра пятна ЛЛ в окрестности $x \rightarrow 0$ претерпевает существенные изменения. При этом функция, описывающая зависимость $A(x)$, подобна резонансной кривой. Таким образом, именно в этих условиях чувствительность измерений резко возрастает, что

представляет значительный интерес для дальнейшего усовершенствования ультразвуковых методик выявления поверхностных несплошностей с помощью ПАВ, возбуждаемых лазерным лучом.

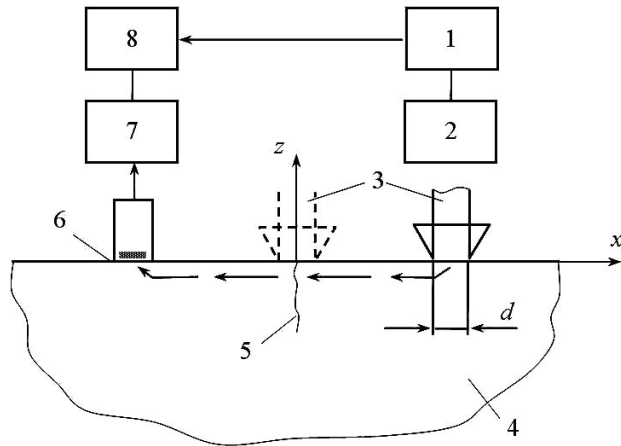


Рисунок 2 – Базовая схема экспериментальной установки по исследованию влияния положения пятна лазерного луча относительно трещины на амплитуду поверхностных акустических волн: 1 – лазер; 2 – устройство коррекции луча; 3 – пятно ЛЛ; 4 – образец; 5 – трещина; 6 – приемник поверхностных акустических волн; 7 – усилитель; 8 – осциллоскоп «Spectronic» TDS 3052B

Figure 2 – Basic scheme of the experimental installation to study the influence of the placement of laser beam spot relative to the crack on the surface acoustic wave amplitude: 1 – laser; 2 – beam correction device; 3 – laser beam spot; 4 – sample; 5 – crack; 6 – surface acoustic wave receiver; 7 – amplifier; 8 – the «Spectronic» TDS 3052B oscilloscope

Необходимо отметить, что обсуждаемые результаты исследований были получены на искусственных образцах с модельной трещиной, внутренние стенки которой плоскопараллельные, а ширина раскрытия трещины δ на порядок больше потенциально опасных для функционирования современных конструкций и сооружений. Кроме того, в указанной работе не изучалось влияние размеров пятна ЛЛ на параметры сигнала-отклика, что весьма важно с точки зрения реализации конкретных высокочувствительных методик контроля на практике.

В настоящей работе для прояснения особенностей проявления упомянутого эффекта и выявления новых закономерностей были проведены дополнительные исследования. При этом в качестве объекта исследований использованы образцы с реальными (усталостными) трещи-

нами, имеющими совершенно другую геометрию внутренних стенок. Ширина же раскрытия трещины практически на порядок меньше, чем в упомянутой выше работе. Кроме того, что весьма важно, в процессе исследований изучалось влияние геометрии пятна ЛЛ на параметры акустического сигнала при прохождении пятна ЛЛ через область с реальной усталостной трещиной, а также модельной поры. Отметим, что в основной части исследований при получении зависимостей $A(x_0)$ варьировалась безразмерная ширина пятна ЛЛ $d^* = d/\lambda$, подобное длинной полосе или кругу.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема исследований представлена на рисунке 2. Установка содержит источник импульсного лазерного излучения, систему коррекции сечения светового пучка, падающего на исследуемый образец, приемник акустических колебаний, в качестве которого использованы пьезоэлектрические наклонные (направленные) преобразователи, усилительный блок и блок его согласования с осциллоскопом «Spectronic» TDS 3052B. Длина волны источника лазерного излучения равна 1,06 мкм.

В качестве образцов с усталостными дефектами (модельными трещинами) и прошедшими аттестацию служили металлические пластины толщиной 7 мм, шириной 30 мм и длиной 70 мм. Усталостные трещины на их поверхности выполнены вдоль короткой стороны методом многоциклового нагружения, разработанном в Институте прикладной физики НАН Беларуси. Геометрические характеристики трещин следующие: для образца № 1 ширина раскрытия устья трещины $\delta \approx 8$ мкм, глубина $h = 400\text{--}500$ мкм; для образца № 2 – $\delta \approx 4$ мкм, $h \approx 300\text{--}400$ мкм; их длина 30 мм. Образцы трещин идентичны реальным и входят в комплект настроечных образцов для капиллярной дефектоскопии. Образец № 3 ($h^* \approx 100\text{--}200$ мкм, $\delta \approx 8\text{--}10$ мкм моделируется путем контакта двух идентичных стальных плиток, между торцевыми поверхностями которых введены жесткие прокладки. Для приема ПАВ использован наклонный ПЭП рэлееской волны с рабочей частотой $f = 2,7$ МГц и магнитным удержанием контактной жидкости.

Регулирование формы пятна ЛЛ (типа полосы или круглого пятна) достигалось специальной

оптической корректирующей системой; оценка размеров этого пятна производилась путем засвечивания лазерным лучом фотопленки. Размеры засвеченной области измерялись с помощью микроскопа. При проведении исследований ширина пятна ЛЛ типа длинная полоса варьировалась от 0,2–0,3 до 5 мм.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Основные результаты исследований иллюстрируются на рисунках 3–5. На рисунке 3 пред-

ставлены осциллограммы сигнала на приемном преобразователе наклонного ПЭП при относительном перемещении пятна ЛЛ типа длинная полоса, когда зона возбуждения ПАВ лежит вне дефекта (рисунки 3а и 3б) и охватывает последний (рисунки 3с и 3д). Рисунок 4 иллюстрирует особенности изменения амплитуды сигнала в зависимости от расстояния пятна ЛЛ до трещины. Зависимость же амплитуды акустического сигнала на преобразователе при изменении положения центра круглого пятна ЛЛ диаметром 3 мм относительно моделируемой бесконечно глубокой трещины представлена на рисунке 5.

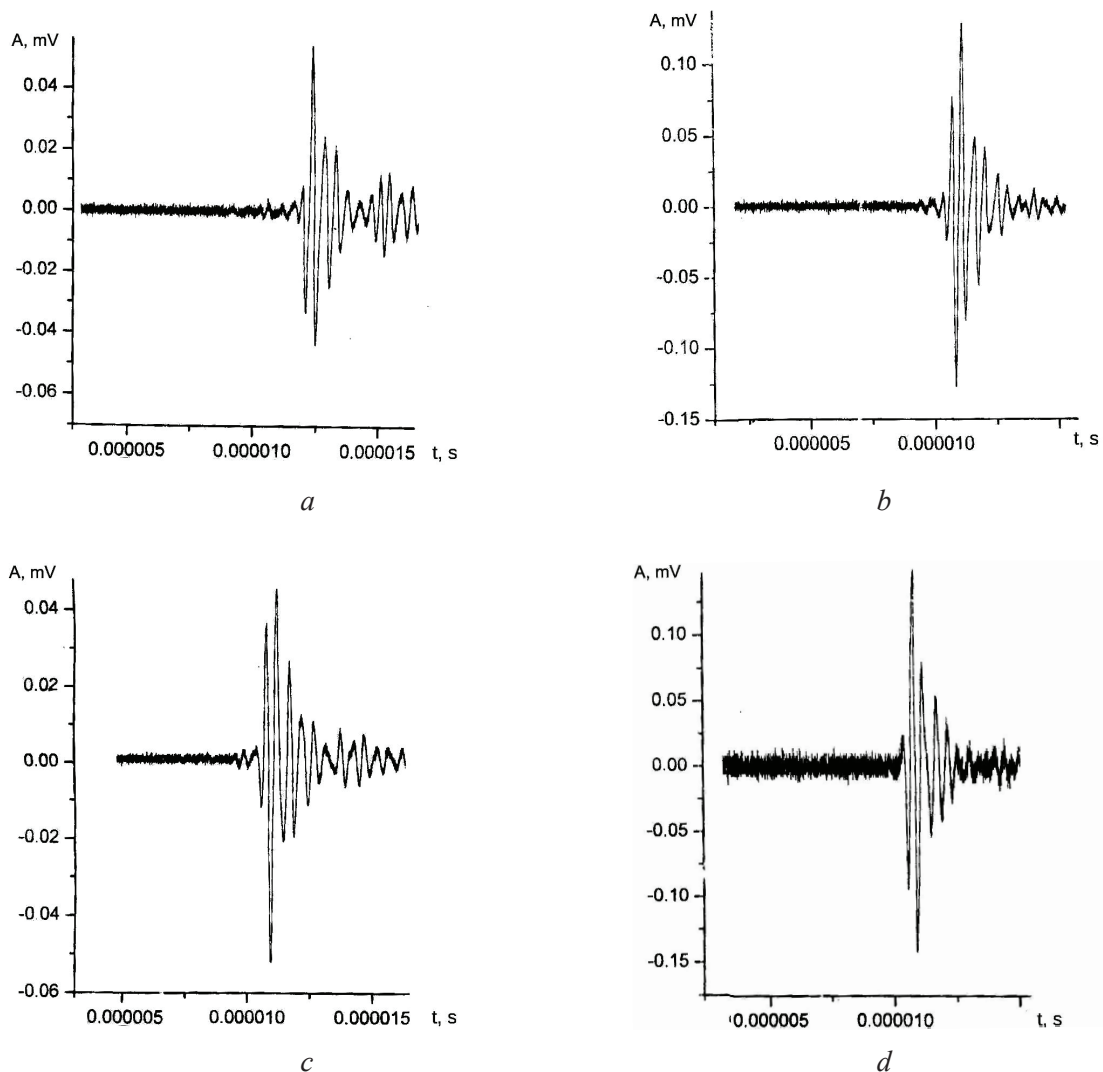


Рисунок 3 – Осциллограммы акустического импульса на приемном преобразователе при изменении положения центра пятна лазерного луча, подобного длинной полосе, на образце с усталостной трещиной шириной $\delta = 4$ мм, глубиной $h = 400\text{--}500$ мкм и длиной 30 мм: x_0 мм = 3 (а); –3 (b); 0,5 (c); –0,5(d); ось ординат в мВ, безразмерная ширина пятна лазерного луча $d^* = d(tC_R)^{-1} = 2,2$

Figure 3 – Oscillograms of an acoustic pulse on the receiving probe at a placement change of the laser beam spot center like a long stripe, on the sample with a fatigue crack of $\delta = 4$ μm width, $h = 400\text{--}500$ μm depth, and 30 mm length: x_0 , mm = 3 (a); –3 (b); 0.5 (c); –0.5(d); non-dimensional width of the laser beam spot $d^* = d(tC_R)^{-1} = 2.2$

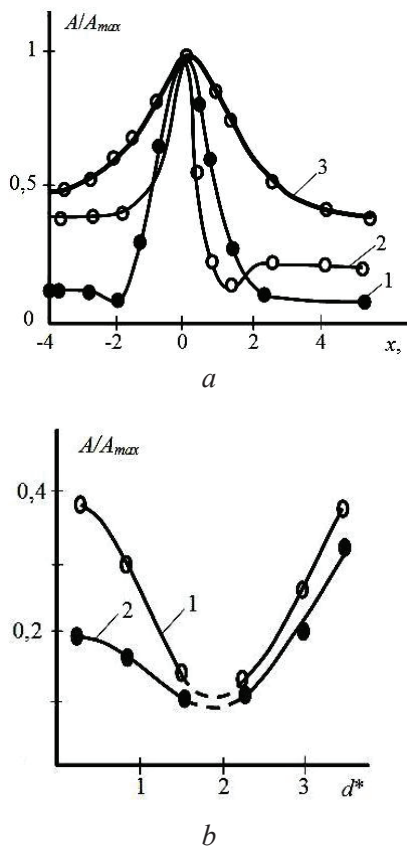


Рисунок 4 – Нормализованная амплитуда акустического сигнала на преобразователе в зависимости от положения центра пятна лазерного луча типа длинной полосы (a) и от ширины d^* пятна лазерного луча (b). a: 1 – $d^* = 2.2$; 2 – 0.2; 3 – 5; b: 1 – A измерено при $x = -4$ мм; 2 – $x = 4$ мм

Figure 4 – Amplitude of an acoustic signal vs. coordinate of the laser beam spot center of a long stripe type (a) and vs. width of the laser beam spot d^* (b). a: 1 – $d^* = 2.2$; 2 – 0.2; 3 – 5; b: amplitude of A measured at $x = -4$ mm (1) and $x = 4$ mm (2)

Результаты экспериментального исследования образцов с реальными усталостными трещинами убедительно подтверждают эффективность методического подхода (по сравнению с традиционным), основанного на использовании такой схемы прозвучивания, при которой анализируется амплитуда и (или) его спектр акустического импульса при пересечении пятном ЛЛ дефектной зоны. Это является основой повышения надежности и достоверности выявления несплошностей. Так, если дефектом служит трещина с раскрытием 4 мкм, то эффективность возбуждения ПАВ наибольшая в том случае, когда центр пятна ЛЛ находится в окрестности координаты трещины ($x = 0$), что сопровождается резким ростом амплитуды зондирующего сигнала на приемном

ПЭП и изменением его формы. Как установлено, максимальное увеличение амплитуды сигнала, характеризуемое коэффициентом $\epsilon_A = A_{max}/A$, достигает 7–8 раз, если ширина пятна ЛЛ выбрана оптимальной величины, которая для данного эксперимента (в безразмерном виде) лежит в диапазоне $d^* = d/\lambda_{ПАВ} = 1.8–2.2$, где A соответствует минимуму амплитуды сигнала при положении центра пятна ЛЛ в окрестности $-4 \text{ мм} \leq x \leq 4 \text{ мм}$. Следует также отметить, что возбуждение ПАВ сопровождается появлением так называемых сателлитов – импульсов, последующих за основным импульсом. Проведенные нами дополнительные исследования [10] показали, что они представляют собой трансформированные на вершине трещины и переотражаемые между базовыми поверхностями поперечные волны. Последние могут быть использованы как для определения глубины трещины, так и для выявления под ними объемных дефектов. (Это же относится и к случаю, когда на поверхности объекта выполнены технологические проточки.)

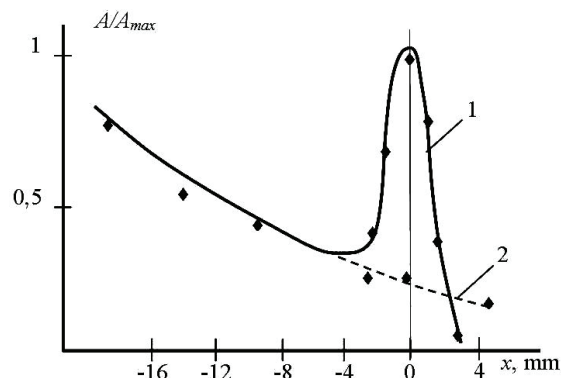


Рисунок 5 – Зависимость нормализованной амплитуды акустического сигнала на преобразователе при изменении положения центра круглого пятна лазерного луча диаметром 3 мм относительно моделируемой бесконечно глубокой трещины

Figure 5 – Dependency of the acoustic signal normalized amplitude on probe at placement change of the round laser beam spot center with 3 mm diameter relative to the modeled infinitely deep crack

Интересным является тот факт, что относительный рост амплитуды сигнала при перемещении пятна ЛЛ через трещину с раскрытием ≈ 0.5 мкм (образец № 4) и длиной $\approx 3–4$ мм составил $\approx 50–60$ %. В этом случае наиболее информативным признаком, характеризующим наличие дефекта, служит именно форма «вступительной» части осцилляции импульса, обусловленная сложным характером формирования сигнала-от-

клика при перемещении пятна ЛЛ в окрестности трещины. Таким образом, повышение чувствительности рассматриваемого метода может быть достигнуто путем использования специальных методов спектральной обработки акустического сигнала.

Следует обратить внимание на то, что если пятно ЛЛ имеет форму круга ($2r = 3$ мм), то изменение (возрастание) амплитуды сигнала при движении пятна через дефектную зону достигает приблизительно 3 раз, т.е. меньше, чем в случае, когда пятно ЛЛ подобно длинной полосе. Однако в этом случае диаграмма направленности $\Phi(\alpha)$ такого источника существенно шире, что позволяет фиксировать дефект, используя меньшее количество приемных преобразователей, включая ненаправленные преобразователи.

Важный результат получен при исследовании рассеяния акустической энергии модельным дефектом типа «бесконечная пора», моделируемая цилиндрическим отверстием диаметром 1 мм. Как установлено, характер изменения формы акустического сигнала при пересечении пятном ЛЛ модельного дефекта подобен тому, какой обнаружен при исследовании образцов с трещинами. Однако при варьировании диаметра пятна ЛЛ и его соосного расположения с главной осью модельной поры было установлено, что даже при достижении соотношения площади дефекта S_D к площади пятна S_L : $\xi_D = S_D/S_L \approx 0,04$ – амплитуда зондирующего сигнала может возрасти в 3–4 раза и более по сравнению с тем случаем, когда дефект отсутствует.

Необходимо отметить, что аналитическое описание оптоакустического тракта рассматриваемой задачи даже в частном случае весьма затруднительно и зависит от комплекса параметров. Среди них физико-механические свойства материала, размеры трещины и степень сжатия ее стенок, спектральные функции возбуждаемых ЛЛ колебаний и их приема преобразователем, а также коэффициента прохождения или преобразования энергии волны на трещине, являющегося весьма сложной функцией не только от указанных параметров, но и от степени контакта (или сжатия) стенок трещины.

По-видимому, для рассматриваемых условий измерений основная причина наблюдаемого изменения параметров зондирующего сигнала заключается в следующем. Во-первых, при перемещении пятна ЛЛ через трещину ($x_0 \rightarrow 0$) теплообмен и передача упругих возмущений между ее

стенками затруднены, т.к. $\sigma_{ik} \rightarrow 0$ и $q_n \rightarrow 0$, где σ_{ik} – тензор напряжений, q_n – тепловой поток, направленный нормально к стенке трещины. Поэтому в общем случае можно считать, что в формировании ПАВ участвуют два источника с изменяемыми (по мере пересечения области с трещиной) поперечными размерами d_1 и d_2 , для которых $d_1 + d_2 = d$. Именно для этого случая передаточная функция измерительного тракта для ПАВ может быть условно представлена в общем виде:

$$\Xi = \tilde{S}\tilde{R}(\tilde{\Psi}^+ + \tilde{\Lambda}\tilde{\Psi}^-),$$

где $\tilde{S}$ – функция приема ПАВ; $\tilde{R}$ – функция прохождения возбуждаемого акустического импульса от зоны расположения трещины до приемного ПЭП; Ψ^+ и Ψ^- – интегральные функции, характеризующие поле двух источников ПАВ, находящиеся в области поверхности воздействия пятна лазерного луча площадью $S = S^+ + S^-$, где индекс (+) соответствует области возбуждаемых волн, лежащей ближе к ПЭП, а индекс (–) – дальше; $\tilde{\Lambda}$ – характеризует эффективность прохождения возбуждаемых волн через своеобразный (звуковой) барьер, создаваемый несопешностью.

Очевидно, что при $h \rightarrow 0$ $\tilde{\Lambda} \rightarrow 1$, и практически половина потока энергии ПАВ будет распространяться в направлении, оппозитном приемному преобразователю. В этом случае на границе главной оси пятна ЛЛ $x = x_0$ создаются условия, подобные условию теплоизоляции. Если же глубина трещины достаточно большая ($h \gg \lambda$), а тепловой контакт между стенками отсутствует, то $\tilde{\Lambda} \rightarrow 0$. Однако при пересечении пятном ЛЛ трещины и его оптимальном положении плотность потока ПАВ, направленного к приемному преобразователю, повысится в результате отражения от одной из стенок трещины. (Кроме того, возрастание амплитуды принимаемого сигнала ПАВ будет наблюдаться и при достижении источником ПАВ (расположенного от трещины ближе к ПЭП), характерного волнового размера kd_1 , соответствующего рабочей частоте преобразователя или ее первой гармонике.) В то же время вследствие проявления этого резонансного явления сигнал на приемном ПЭП может и уменьшиться. Так что наблюдаемые изменения амплитуды ПАВ при варьировании ширины трещины и на приемном ПЭП в 7–8 раз вполне понятны.

Необходимо отметить, что результаты настоящих исследований представляют интерес для создания высокочувствительных методик обна-

ружения поверхностных дефектов в объектах, расположенных в труднодоступных местах, имеющих сложный рельеф поверхности, а также находящихся в движении, включая объекты железнодорожного транспорта, автотракторостроения, теплоэнергетики. При этом один или несколько компактных приемных преобразователей автономно располагают на объекте в зоне повышенной опасности. Проверка дефектности изделия производится путем возбуждения ПАВ внешним источником импульсно-лазерного возбуждения.

Заключение

Проанализированы некоторые схемы обнаружения поверхностных дефектов с использованием импульсно-лазерного возбуждения поверхностных волн и приема их контактными преобразователями. Обращено внимание на эффективность использования для этих целей режима прозвучивания объекта при прохождении пятна лазерного луча именно через зону с дефектом – трещиной или порой.

На основе разработанной установки с источником импульсно-лазерного излучения с длительностью импульса 20 нс и длиной волны 1,06 мкм впервые получены зависимости амплитудных параметров генерируемых лазерным излучением поверхностных волн при прохождении пятном лазерного луча зоны с реальными усталостными трещинами, имеющими ширину раскрытия от 8 до 0,5 мкм.

Установлено, что оптимальные условия выявления дефекта по амплитудному признаку имеют место при определенном значении отношения ширины пятна лазерного луча D к длине поверхностной волны λ_s , что характерно для резонансного режима возбуждения. Таким образом, при возбуждении поверхностных волн импульсно-лазерным излучением представляется возможным существенно повысить выявляемость поверхностных дефектов путем варьирования размеров пятна лазерного луча, пересекающего реальную усталостную трещину, что подтверждается ростом амплитуды рассеянной волны в 7–8 раз при ширине раскрытия усталостной трещины приблизительно 4 мкм. В ряде случаев, когда ширина раскрытия трещин достигает приблизительно 0,5 мкм и менее, предлагается уменьшить длительность импульса и повысить резонансную частоту приемного преобразователя либо использовать вступительную часть импуль-

са в качестве информативного параметра дефектности объекта. Экспериментально показано, что при отношении площади дефекта в виде поры к площади пятна лазерного луча приблизительно 4 % изменение амплитуды рассеянной поверхностной волны составляет 4–5 раз, что позволяет существенно сократить время контроля объектов указанным комбинированным методом.

Результаты настоящих исследований представляют интерес для создания высокочувствительных методик обнаружения поверхностных дефектов в объектах, расположенных в труднодоступных местах, имеющих сложный рельеф поверхности, а также находящихся в движении, включая объекты железнодорожного транспорта, автотракторостроения, теплоэнергетики. При этом один или несколько компактных приемных преобразователей автономно располагают на объекте в зоне повышенной опасности. Проверка дефектности изделия производится путем возбуждения ПАВ внешним источником импульсно-лазерного возбуждения.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект Т15-163 от 4 мая 2015 г.

Список использованных источников

1. Гусев, В.Э. Лазерная оптоакустика / В.Э. Гусев, А.А. Карабутов. – М. : Наука, 1991. – 304 с.
2. Xie, Z. Pure optical photoacoustic microscopy / Z. Xie [et al.] // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19, no. 10. – P. 9027–9034.
3. Pouet, B. An Innovative Interferometer for Industrial Laser Ultrasonic Inspection / B. Pouet, S. Breugnot // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 24B. – 2004. – P. 273–281.
4. Hirose, S. Ultrasonic Inversion for Determining crack in a solid / S. Hirose // J. of The Faculty of Environmental Science and Technology. – 1997. – Vol. 2, no. 1. – P. 89–98.
5. Krishnaswamy, S. Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2003. – Vol. 20A. – P. 436–492.
6. Podymova, N.B. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CERP laminates / N.B. Podymova, A.A. Karabutov // J. of Non-destructive Evaluation, USA. – Vol 33, no. 1. – P. 141–150.
7. Способ оптоакустического контроля качества неразъемного соединения двух материалов : пат.

на изобретение Респ. Беларусь G01N N 20111234 / А.Р. Баев, В.Г. Гуделев, А.И. Митьковец. – заявл. 09.2011; опубл. 30.08.2013.

8. Kolkman, R.G.M. Feasibility of noncontact piezoelectric detection of photoacoustic signals in tissue-mimicking phantoms / R.G.M. Kolkman [et al.] // *J. Biomed Opt.* – 2010. – Vol. 15, no. 5. – P. 055011.

9. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И.А. Викторов. – М. : Наука, 1981. – 288 с.

10. Baev, A.R. Formation of the Acoustical Field of a Rayleigh –Wave Transducer in an Object with a Protrusion Part II / A.R. Baev, M.V. Asadchaya, O.S. Sergeeva, G.E. Konovalov // *Applied Problems Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2014. – No. 7. – P. 25–32.

This work was performed by partial support of Belarusian Republic Fond of Fundamental Researches: project № T15-163, May 4, 2015.

References

1. Gusev V.E., Karabutov A.A. *Lasernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 304 p. (in Russian).

2. Xie Z., Chen S.L., Ling T., Guo L.J., Carson P.L., Wang X. Pure optical photoacoustic microscopy. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 9027–9034.

doi: org/10.1364/OE.19.009027

3. Pouet B., Breugnot S. An Innovative Interferometer for Industrial Laser Ultrasonic Inspection. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2004, vol. 24B, pp. 273–281. doi: org/10.1063/1.1916688

4. Hirose S. Ultrasonic Inversion for Determining crack in a solid. *J. of The Faculty of Environmental Science and Technology*, 1997, vol. 2, pp. 89–98.

5. Krishnaswamy Sridhar. Theory and Application of Laser-Ultrasonic Techniques. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003, vol. 20A, pp. 436–492.

6. Podymova N.B., Karabutov A.A. Broadband laser-ultrasonic spectroscopy for quantitative characterization of porosity effect on acoustic attenuation and phase velocity in CERP laminates. *J. of Nondestructive Evaluation*, 2005, vol. 33, pp. 141–150.

doi:10.1007/s10921-013-0210-z

7. Baev A.R., Gudelev V.G., Mitscovets A.I. *Sposob optoakusticheskogo kontrolya kachestva nerazjemnogo soedineniya dvukh materialov* [Optoacoustic method of the materials contact quality evaluation]. Pat. RB, no. 20111234, 2011.

8. Kolkman R.G.M., Blomme E., Cool T., Bilcke M., Leeuwen T.G. van, Steenbergen W., Grimbergen K.A., Heeten G.J. den. Feasibility of noncontact piezoelectric detection of photoacoustic signals in tissue-mimicking phantoms. *J. Biomed. Opt.*, 2010, pp. 55–64.

doi: 10.1117/1.3491113

9. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 288 p. (in Russian).

10. Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Konovalov G.E. Formation of the Acoustical Field of a Rayleigh Wave Transducer in an Object with a Protrusion, Part II. *Applied Problems. Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 24, pp. 25–32.

doi: 10.1134/S1061830914080038

УДК 53.089.62; 519.245; 539.125.52

Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты

Комар Д.И.¹, Лукашевич Р.В.¹, Гузов В.Д.¹, Кутень С.А.²

¹УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 13.10.2016

Принята к печати 10.11.2016

Развитие и распространение техногенных источников высокоэнергетического вторичного гамма-излучения приводит к ряду прикладных задач радиационной защиты, в которых спектрометрические и дозиметрические измерительные приборы используются в фотонных полях в диапазоне энергий от 4 до 10 МэВ. Целью данной работы являлась проверка возможности формирования эталонных полей захватного гамма-излучения при помощи источника быстрых нейтронов и мишеней из титана и никеля с энергиями до 10 МэВ.

Корректная калибровка предполагает наличие в эталонном спектре излучения одиночных линий с известной энергией. До 3 МэВ задача решается при помощи набора радионуклидных источников ОСГИ. Для формирования эталонного фотонного поля с энергиями до 10 МэВ можно использовать захватное гамма-излучение от мишеней из титана и никеля, находящихся в поле тепловых нейтронов. Поток нейтронов с тепловыми энергиями может быть получен замедлением быстрых нейтронов от радионуклидных источников $^{238}\text{Pu-Be}$, ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$. В качестве замедлителя нейтронов обычно используются водородосодержащие материалы (полиэтилен и парафин).

Коллиматор тепловых нейтронов установки поверочной нейтронной излучения (УПН-АТ140, УП «АТОМТЕХ») формирует пучок от радионуклидного источника со значительной составляющей нейтронов тепловых энергий. Размещение мишеней в канале коллиматора позволило получить поле гамма-излучения с характерными для материала мишени энергиями. Экспериментальные спектры получены на спектрометрическом блоке детектирования БДКГ-19М NaI(Tl) 63×160 мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ. На спектрах хорошо различимы основные линии захватного излучения от водорода, титана и никеля. В качестве дополнительной фильтрации предложено использовать отражатель нейтронов из полиэтилена и свинцовые диски.

Показано, что размещение дисков из свинца в коллиматоре перед мишенью позволяет фильтровать весь спектр, при этом незначительно ослабляя излучение именно от мишени. На основании теоретических и экспериментальных данных подтверждена возможность калибровки спектрометров гамма-излучения в диапазоне до 10 МэВ в поле мгновенного захватного гамма-излучения.

Ключевые слова: коллиматор тепловых нейтронов, мгновенное захватное гамма-излучение, спектрометрический блок детектирования, мишень из титана, мишень из никеля.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

Адрес для переписки:

Комар Д.И.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь
e-mail: damiankomar@yandex.ru

Address for correspondence:

Komar D.
SPE «ATOMTEH»,
Gikalo St., 5, 220005, Minsk, Belarus
e-mail: damiankomar@yandex.ru

Для цитирования:

Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.
Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 296–304.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

For citation:

Komar D., Lukashevich R., Guзов V., Kutsen S.
[Neutron capture gamma ray field with energy to 10 MeV for metrological support of radiation protection devices].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 296–304 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

Neutron capture gamma ray field with energy to 10 MeV for metrological support of radiation protection devices

Komar D.¹, Lukashevich R.¹, Guzov V.¹, Kutsen S.²

¹SPE «ATOMTEX»

Gikalo str., 5, 20005, Minsk, Belarus

²Research Institute for Nuclear Problems,

Bobruiskaya str., 11, 220030, Minsk, Belarus

Received 13.10.2016

Accepted for publication 2016

Abstract

Medical, and technological linear particle accelerators, and nuclear reactors are vastly widespread worldwide today. These facility generate fields of secondary gamma radiation with energy to 10 MeV. Therefore, we have a need to calibrate spectrometric and dosimetric ionization measurement instruments for the energies to 10 MeV. The aim of this work is to determine possibility to use thermal neutron collimator of AT140 Neutron Calibration Facility with ²³⁸Pu-Be fast neutron source (IBN-8-6) for this.

Below 3 MeV we use a set of point gamma standard spectrometry sources OSGI. We can acquire gamma rays with energies above 3 MeV using radioactive thermal neutron capture on target, i.e. (*n*, γ)-nuclear reaction. We can use neutron capture gamma-ray from titanium target (to 7 MeV) or nickel target (to 10 MeV) situated in thermal neutron field for calibration. We can use thermal neutron collimator of AT140 Neutron Calibration Facility with ²³⁸Pu-Be fast neutron source (IBN-8-6) for slowing down neutrons from radionuclide fast neutron sources to thermal energies in polyethylene.

Thermal neutron collimator forms a beam from radionuclide source with a significant amount of neutrons with thermal energies. We placed Ti and Ni targets in collimator's canal. We got experimental spectral data on detection unit BDKG-19M NaI(Tl) 63 × 160 mm with nonlinear channel-energy conversion characteristic in range to 10 MeV. For additional filtration we proposed to use polyethylene neutron reflector and lead discs.

We experimentally determined that placement of lead discs in collimator in front of the target allows to filter all spectrum while insignificantly weakening target's emission. Using theoretical and experimental data we proved the ability to calibrate gamma-ray spectrometers in the range to 10 MeV.

Keywords: thermal neutrons collimator, neutron capture prompt gamma-ray, spectrometric detector, titanium target, nickel target.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

Адрес для переписки:

Комар Д.И.

УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

e-mail: damiankomar@yandex.ru

Address for correspondence:

Komar D.

SPE «ATOMTEX»,

Gikalo St., 5, 220005, Minsk, Belarus

e-mail: damiankomar@yandex.ru

Для цитирования:

Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.

Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты.

Приборы и методы измерений.

2016. – Т. 7, № 3. – С. 296–304.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

For citation:

Komar D., Lukashevich R., Guzov V., Kutsen S.

[Neutron capture gamma ray field with energy to 10 MeV for metrological support of radiation protection devices].

Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].

2016, vol. 7, no. 3, pp. 296–304 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-296-304

Введение

Широкое распространение медицинских ускорителей и ускорителей элементарных частиц (электронов и протонов) приводит к появлению ряда прикладных задач контроля и радиационной защиты, при решении которых спектрометрические и дозиметрические измерительные приборы будут находиться в импульсных полях вторичного гамма-излучения в диапазоне энергий до 10 МэВ.

На АЭС основными источниками гамма-излучения являются: мгновенное излучение с энергией до 7,5 МэВ, сопровождающее процесс деления ядерного топлива; захватное излучение на ядрах элементов, входящих в состав активной зоны (топливо, замедлитель, теплоноситель, конструкционные материалы) с максимальной энергией до 10 МэВ; активационное излучение образовавшихся в результате захвата нейтронов стабильными ядрами материалов активной зоны (69 % составляют гамма-кванты 6,13 МэВ, образовавшихся по реакции $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$). В спектре гамма-излучения, вылетающего из активной зоны реактора, на фоне непрерывного распределения хорошо различимы пики захватного гамма-излучения, возникающего при взаимодействии тепловых нейтронов с ядрами ^{57}Fe , ^{58}Fe , ^{54}Cr , ^{59}Ni и водорода [1, 2].

Для метрологического обеспечения измерений необходимо знание отклика средств измерений в пределах рабочего энергетического диапазона. Корректная энергетическая калибровка предполагает наличие в эталонном спектре одиночных линий с известной энергией. При калибровке до 3 МэВ эту проблему можно решить набором радионуклидных гамма-источников типа ОСГИ (таких, как Cd-109, Am-241, Co-57, Cs-137, Co-60, Ra-226 и др.).

Гамма-кванты с энергиями более 3 МэВ могут быть получены в результате радиационного захвата нейтрона ядром атома, т.е. ядерной реакции (n, γ). Сечение реакции радиационного захвата нейтронов увеличивается с уменьшением энергии нейтронов [3]. Каждый изотоп обладает своим уникальным набором характеристических энергий захватного излучения. Быстрые нейтроны от радионуклидных источников могут быть замедлены до тепловых энергий при помощи водородосодержащих замедлителей (полиэтилен, парафин, вода) и направлены на специальную мишень. Таким образом, простейший источник

мгновенного захватного гамма-излучения должен состоять из источника быстрых нейтронов, замедлителя нейтронов и облучаемой тепловыми нейтронами мишени. При проектировании такого источника необходимо учитывать, что в спектре гамма-излучения будут присутствовать характеристические линии захватного излучения от материалов замедлителя, от конструкционных материалов, от биологической защиты источника, стен помещения и воздуха. Эти гамма-линии могут накладываться на линии мишени и ухудшать «качество» поля. Поэтому материалы необходимо подбирать с небольшими сечениями радиационного захвата нейтронов и с характеристическими линиями, значительно отличающимися по энергии от линий мишени. Для энергетической калибровки до 7 МэВ в качестве мишени можно использовать титан, а по энергии до 10 МэВ – никель [4, 5]. К настоящему времени известны примеры построения источника захватного гамма-излучения на основе ^{252}Cf и ^{241}Am -Be-источников нейтронного излучения [6, 7].

Целью данной работы являлось экспериментальное и теоретическое (при помощи моделирования методами Монте-Карло) исследование возможности применения стандартного коллиматора тепловых нейтронов установки поверочной нейтронного излучения (УПН-АТ140, УП «АТОМТЕХ») с ^{238}Pu -Be источником нейтронов (типа ИБН-8-6), как источника гамма-излучения в диапазоне энергий до 10 МэВ для проверки и калибровки спектрометров и дозиметров гамма-излучения в расширенном диапазоне энергий. Монте-Карло моделирование проводилось с помощью кода *MCNP* (версия *MCNP 4b*) [8].

Материалы и методы

В лабораторной практике для получения гамма-излучения с энергиями до 10 МэВ удобно использовать радиационный захват тепловых нейтронов из-за низкой пороговой энергии реакции (тепловые энергии), больших сечений захвата тепловых нейтронов (единицы барн), широкой распространенности и доступности радионуклидных источников нейтронов, которые создают стационарное во времени нейтронное поле.

Коллиматор тепловых нейтронов формирует пучок от радионуклидного источника со значительной составляющей нейтронов тепловых

энергий [9]. Размещение мишени на выходе коллиматора позволит получить поле гамма-излучения с определенными энергиями. Для эталонного поля захватного гамма-излучения в диапазоне от 4 до 10 МэВ целесообразно использовать мишени из титана и никеля [10]. Титан и никель имеют

наибольшие сечения захвата тепловых нейтронов в области до 7 и до 10 МэВ соответственно. В таблице приведены наиболее интенсивные линии захватного излучения для материалов коллиматора, стен помещения, воздуха и мишеней из никеля и титана [10].

Таблица/Table

Наиболее интенсивные линии мгновенного захватного гамма-излучения

The most intense prompt neutron capture gamma-ray

Элемент Element	Энергия фотонов, МэВ Photon energy, MeV	Сечение захвата основных линий, барн Cross-section most intense gamma-ray, barn	Полное сечение захвата, барн Total cross-section, barn
^1_1H	2,223	0,3326	0,3326
$^{10}_5\text{B}$	0,477	716	716
$^{12}_6\text{C}$	3,683; 4,945	0,00122; 0,00261	0,00353
$^{13}_{13}\text{Al}$	1,778; 7,724	0,232; 0,0493	0,231
$^{14}_{14}\text{Si}$	3,538; 4,933	0,1190; 0,1120	0,177
$^{14}_7\text{N}$	5,269; 5,297; 5,533	0,0236; 0,0168; 0,0155	0,0795
$^{48}_{48}\text{Cd}$	0,245; 0,558; 0,651	274; 1860; 358	2522
$^{24}_{24}\text{Cr}$	7,938; 8,884; 9,719	0,424; 0,78; 0,26	3,07
$^{26}_{26}\text{Fe}$	0,352; 7,631; 7,645	0,273; 0,653; 0,549	2,56
$^{29}_{29}\text{Cu}$	0,159; 0,278; 7,915	0,648; 0,893; 0,869	3,795
$^{22}_{22}\text{Ti}$	0,341; 1,381; 1,586; 6,418; 6,760	1,84; 5,18; 0,624; 1,96; 2,97;	6,08
$^{28}_{28}\text{Ni}$	6,837; 7,536; 7,819; 8,533; 8,998	0,458; 0,190; 0,336; 0,721; 1,49	4,39

В работах [6, 7] приводятся примеры построения источников захватного гамма-излучения на основе ^{252}Cf и ^{241}Am -Ве-источников нейтронного излучения. Из опубликованных в этих работах экспериментальных спектров видно, что наиболее интенсивные пики (кроме пиков от мишени) соответствуют захвату теплового нейтрона на ядре водорода (2,223 МэВ), образованию пар (0,511 МэВ) и (α, n) -реакции на бериллии в источнике нейтронов (4,439 МэВ). Если проблему присутствия в спектре гамма-линий с энергией 4,439 МэВ от радионуклидного источника можно решить применением источника спонтанного деления на основе ^{252}Cf , то уменьшить интенсивность водородной линии можно только дополнительной фильтрацией.

Моделирование проводилось с помощью кода *MCNP-4b* [8]. В работе [9] описывается разработка Монте-Карло модели коллиматора тепловых нейтронов, ^{238}Pu -Ве-источника ИБН-8-6 и помещения. В сформированной Монте-Карло модели для определения характеристик поля захватного гамма-излучения в заданной точке, необходимо учитывать распространение и нейтронов и фотонов. Местом рождения нейтронов в данной задаче является ячейка активного вещества изо-

тропного источника нейтронов, гамма-кванты же являются вторичными частицами и образуются в результате различных взаимодействий во всей области решения задачи. В программе *MCNP* можно решать одновременно задачу транспорта нейтронов и гамма-квантов, включением специальной функции *mode N, P* (*mode N* – для нейтронов, *mode P* – для гамма-квантов).

Были изготовлены мишени в форме дисков ($d = 300$ мм) из титана (Плита ВТ 1-0 ГОСТ 23755-79) толщиной 15 мм и никеля (Никель Н-1 ГОСТ 849-97) толщиной 10 мм. Диаметр дисков соответствует диаметру выходного канала коллиматора тепловых нейтронов.

Результаты и их обсуждение

Для экспериментального изучения спектральных характеристик поля захватного излучения, формируемого коллиматором установки с ^{238}Pu -Ве-источником нейтронов, использовался спектрометрический блок детектирования БДКГ-19М NaI(Tl) 63×160 мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ. Количество каналов АЦП блока БДКГ-19М равно 1024. При измерениях блок

размещался по оси коллиматора на расстоянии 700 мм между центрами кристалла и источника нейтронов. На рисунке 1 приведены спектры для

мишеней из титана и из никеля, полученные при помощи блока БДКГ-19М. Спектры нормированы по времени на 1 с.

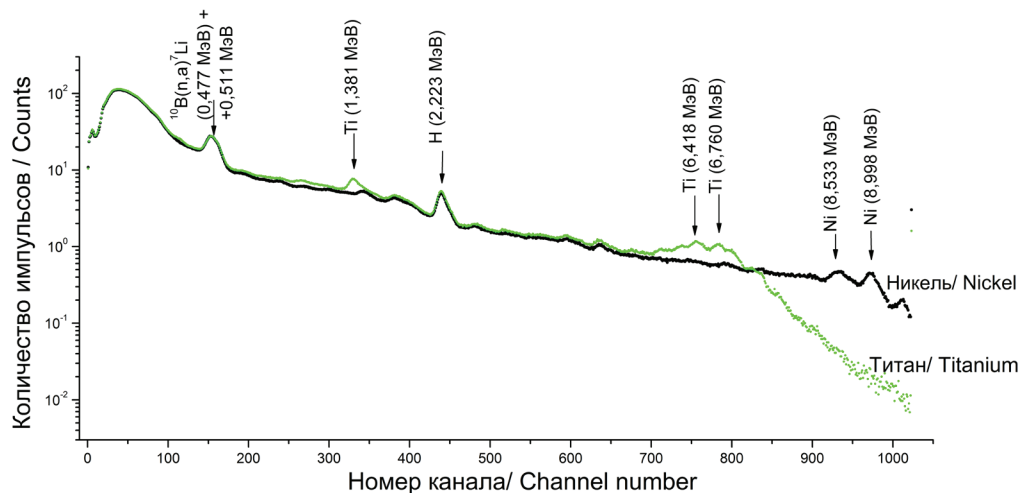


Рисунок 1 – Экспериментальные спектры для мишеней из титана и никеля

Figure 1 – Experimental spectra for Titanium target and Nickel target

На спектрах хорошо различимы линии титана и никеля, линия захвата на водороде 2,223 МэВ. Из-за невысокой разрешающей способности кристалла NaI(Tl) (по Cs-137 приблизительно 7 %) линии 0,477 МэВ захвата ядром ^{10}B и 0,511 МэВ образования пар неразрешимы. Пики полного поглощения, соответствующие мишеням никеля и титана, можно использовать для калибровки спектрометров гамма-излучения по энергии до 10 МэВ.

Для увеличения интенсивности линий мишеней на фоне остального спектра, а также для увеличения средней энергии спектра необходимо применять дополнительную фильтрацию гамма-излучения. При этом следует учитывать природу излучения и геометрию теплового коллиматора. Коллиматор тепловых нейтронов в данной задаче представляет собой объемный источник захватного гамма-излучения, рассеянного излучения и гамма-излучения, сопутствующего образованию быстрых нейтронов в ^{238}Pu -Ве-источнике. Все эти гамма-кванты образуются до мишени (если смотреть по направлению пучка нейтронов). Для данной задачи существует несколько подходов к фильтрации:

1) использование фильтра из материала с небольшим атомным номером (например, алюминий) для сплошной фильтрации (как излучения от коллиматора, так и от мишени); средняя энергия увеличивается из-за уменьшения коэффициента поглощения с ростом энергии;

2) увеличение плотности потока тепловых нейтронов в месте расположения мишени водородосодержащими «отражателями» тепловых нейтронов;

3) фильтр из материала с малым сечением захвата нейтронов, но высоким атомным номером, располагающийся между источником нейтронов и мишенью.

Проверка целесообразности применения сплошного фильтра проводилась при помощи Монте-Карло моделирования. Энергетическое распределение плотности потока фотонов от мишени из никеля рассчитывалось для сферы радиусом 1 мм, расположенной на расстоянии 70 см от центра источника нейтронов, при помощи карты tally F4 [8]. Расчеты проводились с различными толщинами алюминиевого экрана. Результат был нормирован на выход нейтронов из источника (рисунок 2).

Из приведенного спектра видно, что такой способ фильтрации позволяет уменьшить интенсивность гамма-излучения в области с энергией меньше энергии захвата на протоне 2,223 МэВ, но при этом также сильно снижается интенсивность линий никеля. Излучение от титановой мишени имеет меньшую энергию и ослабление будет еще больше. В спектре для случая фильтрации 30 см алюминия отчетливо просматривается составляющая рассеянного на стенах помещения и в самом фильтре гамма-излучения в области энергий до 300 кэВ.

Можно увеличить плотность потока тепловых нейтронов в мишени, и тогда увеличится число полезных захватов. Эффект достигается при установке вплотную к мишени «отражателя» с высоким коэффициентом альбеда нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов через мишень увеличивается из-за большого количества

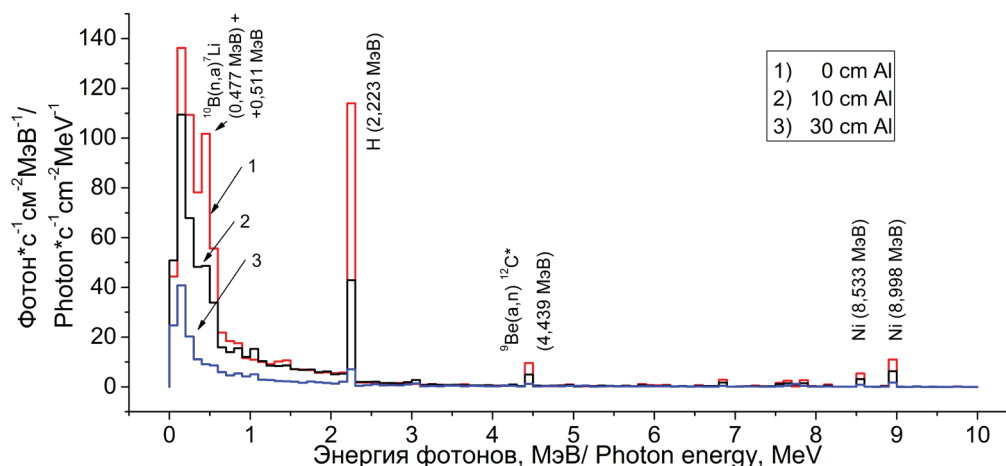


Рисунок 2 – Спектры захватного гамма-излучения для мишени из никеля при различных толщинах алюминиевого фильтра

Figure 2 – Spectrum of Neutron Capture Gamma-Ray for Nickel target with different thicknesses of the aluminum filter

рассеянных отражателем нейтронов. Для таких целей хорошо подходит полиэтилен.

Оценка соответствующего изменения интенсивности излучения при добавлении отражателя из полиэтилена проводилась при помощи разработанных Монте-Карло моделей коллиматора с мишенями из титана и никеля по линиям с наибольшей энергией (6,761 МэВ для титана и 8,998 МэВ для никеля). Размещение в поле тепловых нейтронов водородосодержащего материала (полиэтилен) будет неизбежно приводить к увеличению числа захватов на протоне, поэтому интенсивность линии 2,223 МэВ необходимо контролировать (рисунок 3).

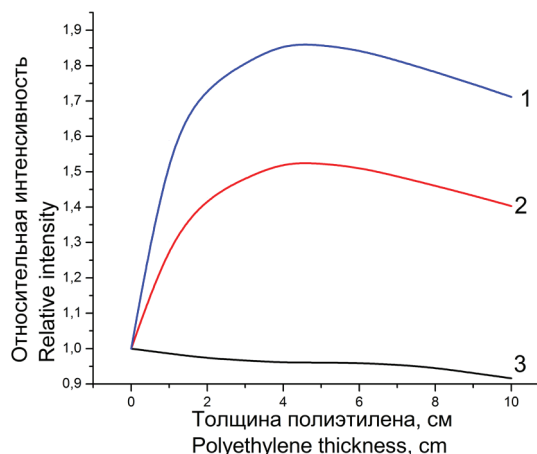


Рисунок 3 – Зависимости интенсивности линий 6,761 МэВ для титана (1), 8,998 МэВ для никеля (2) и 2,223 МэВ (3) от толщины полиэтилена

Figure 3 – The dependence of the energy intensity 6,761 MeV for Titanium target (1), 8,998 MeV for Nickel target (2) and 2,223 MeV on the thickness of the polyethylene

Максимальный выход захватного излучения от мишеней наблюдается при толщине полиэтилена 5 см. Дальнейшее добавление полиэтилена приводит к ослаблению захватного излучения. Линия с энергией 2,223 МэВ ослабляется значительно медленнее из-за захвата тепловых нейтронов ядрами водорода во всем объеме добавочного полиэтилена.

Из полиэтилена (ПНД ГОСТ 16338-85) изготовлены диски толщиной 25 мм и диаметром 300 мм для размещения в канале коллиматора тепловых нейтронов. Диски устанавливались вплотную к мишени. При помощи спектрометрического блока детектирования БДКГ-19М получены экспериментальные спектры для различного количества дисков (суммарная толщина полиэтилена; рисунок 4).

Отражатель из полиэтилена позволяет существенно увеличить интенсивность излучения от мишени. Высота пиков полного поглощения, соответствующих линиям никеля, максимальна при толщине 50 мм полиэтилена. Остальная часть спектра ослабляется, но при этом незначительно увеличивается количество рассеянного в полиэтилене излучения (в области около 150 кэВ). Кроме того, полиэтилен ослабляет пучок нейтронов, которые покинув коллиматор будут вступать во взаимодействие с кристаллом детектора и стенами помещения.

Перед мишенью можно разместить фильтр из материала с высоким атомным номером, но при этом с малым сечением взаимодействия с нейтронами тепловых и промежуточных энергий. Такой фильтр будет незначительно влиять на тепловую

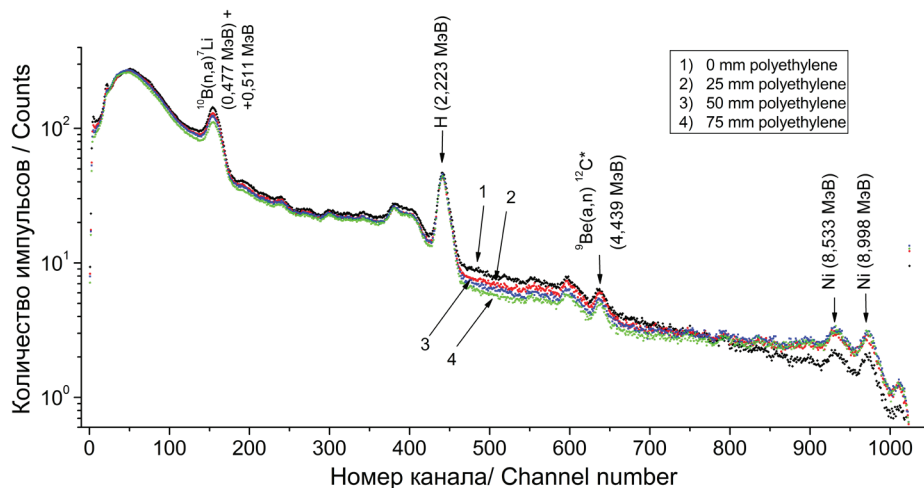


Рисунок 4 – Экспериментальные спектры для мишени из никеля при различных толщинах полиэтилена
Figure 4 – Experimental spectra for Nickel target with different thicknesses of polyethylene

компоненту пучка нейтронов и сильно ослаблять гамма-излучение от остальных источников.

Из материалов с высоким атомным номером наиболее доступны вольфрам ($Z = 74$) и свинец ($Z = 82$). Вольфрам имеет большое сечение захвата тепловых нейтронов ($\sigma_{\gamma}^z = 18,39$ барн) [11], поэтому в качестве материала фильтра был выбран свинец.

Фильтр из свинцовых пластин должен размещаться перед мишенью, а полиэтилен – после мишени. На рисунке 5 представлена Монте-Карло модель коллиматора тепловых нейтронов с фильтром из свинца и полиэтиленовым отражателем.

Экспериментальные спектры для мишени из никеля с полиэтиленом 50 мм при различных толщинах свинцового фильтра приведены на рисунке 6.

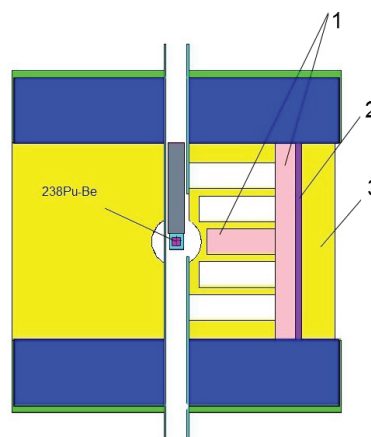


Рисунок 5 – Монте-Карло модель коллиматора тепловых нейтронов: 1 – свинец; 2 – мишень; 3 – полиэтилен
Figure 5 – Monte-Carlo model of the thermal neutrons collimator: 1 – lead; 2 – target; 3 – polyethylene

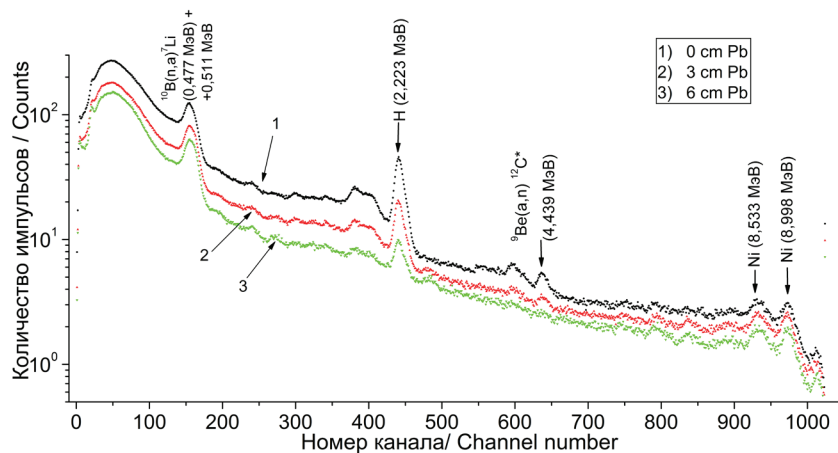


Рисунок 6 – Экспериментальные спектры для мишени из никеля при различных толщинах свинцового фильтра
Figure 6 – Experimental spectra for Nickel target with different thicknesses of lead filter

В спектрах с фильтром из свинца 3 см и 6 см наблюдается значительное «проседание» в области энергий ниже «водородной». Для 3 см свинца интенсивность линии никеля уменьшилась в 1,28 раза, а линия 2,223 МэВ уменьшилась в 2,35 раза. Если использовать алюминиевый фильтр после мишени, то при ослаблении никеля в 1,28 раз, пик 2,223 МэВ ослабился бы только в 1,47 раз, а если использовать свинец – то в 1,24 раза [12].

Заключение

Теоретически и экспериментально подтверждена возможность получения и использования поля захватного гамма-излучения, формируемого коллиматором тепловых нейтронов поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140 с ^{238}Pu -Ве-источником быстрых нейтронов и мишенями из титана и никеля. При помощи мишени из титана можно формировать поля до 7 МэВ, а при помощи никеля поля – до 10 МэВ.

Показано, что в данной задаче неприемлемо использовать сплошную фильтрацию всего спектра гамма-излучения. Предложено увеличить интенсивность гамма-излучения от мишени в поле тепловых нейтронов установкой вплотную к ней полиэтиленовой пластины (диска). Максимальный выход гамма-излучения для мишеней из никеля и из титана наблюдается при толщине полиэтилена 5 см (справедливо только для ^{238}Pu -Ве-источника нейтронов).

Размещение пластин из свинца до мишени позволяет фильтровать излучение от захватов в материалах коллиматора и от источника нейтронов гораздо эффективнее, чем сплошной фильтрацией. Для 3 см свинца линии никеля ослабились в 1,28 раз, а линия 2,223 МэВ – в 2,35 раз.

Результаты, полученные в ходе этого исследования, будут использованы в дальнейшей работе по расчету фильтрации как гамма-, так и нейтронного излучения.

Список использованных источников

1. Nakashima, Y. Gamma-Ray Energy Spectra Observed around a Nuclear Reactor / Y. Nakashima, S. Minato, M. Kawano // *Journal of Radiation Research*. – 1971. – Vol. 12, no. 4. – P. 138–147.
2. Itsumasa, U. Systematics of Gamma-Ray Energy Spectra for Classification of Workplaces around a Nuclear Facility / U. Itsumasa, T. Tadashi // *J. Jpn. Health Phys. Soc.* – 1985. – Vol. 3. – P. 1440–1443.

3. Беланова, Т.С. Радиационный захват нейтронов / Т.С. Беланова, А.В. Игнатюк, А.Б. Пашченко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

4. Bermann, F. ed. Capture Gamma Ray Beam for the Calibration of Radioprotection Dosimeters between 5 and 9 MeV / F. Bermann [et al.] // *Radiation Protection Dosymetry*. – 1990. – Vol. 30. – P. 237–243.

5. Troubetzcoy, E. Complication of Information on Gamma-Ray Spectra Resulting from Thermal-Neutron Capture / E. Troubetzcoy, H.A. Goldstein. – Oak Ridge National Laboratory, 1960. – 78 p.

6. Kroupa, M. Wide energy range gamma-ray calibration source / M. Kroupa, C. Granja, Z. Janout // *Journal of Instrumentation*. – 2011. – No. 6. – 12 p.

7. Rogers, J.G. A 7–9 MeV isotopic gamma-ray source for detector testing / J.G. Rogers, M.S. Andreaco, C. Moisan // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1998. – Vol. 413. – P. 249–254.

8. Briesmeister, J.F. ed. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. / J.F. Briesmeister. – Report LA-12625-M.-Los Alamos. – NM : Los Alamos National Laboratory, 1997. – 736 p.

9. Комар, Д.И. Монте-Карло моделирование метрологических характеристик установки поверочной нейтронного излучения УПН-АТ140 / Д.И. Комар, С.А. Кутень, В.Д. Гузов // *Экологический вестник*. – 2016. – № 3 (37). – С. 54–61.

10. Choi, H.D. Database of prompt gamma-rays from slow neutron capture for elemental analysis / H.D. Choi, R.B. Firestone, R.B. Lindstorm. – Vienna : International atomic Energy Agency, 2006. – 252 p.

11. Kopecky, J. Ed. Atlas of Neutron Capture Cross Sections/ J. Kopecky. – Vienna : International atomic Energy Agency, 1997. – 370 p.

12. Машкович, В.П. Защита от ионизирующих излучений / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – М: Столица, 2013. – 494 с.

References

1. Nakashima Y., Minato S., Kawano M. Gamma-Ray Energy Spectra Observed around a Nuclear Reactor. *Journal of Radiation Research*, 1971, vol. 12, no. 4, pp. 138–147. doi: 10.1269/jrr.12.138
2. Itsumasa U., Tadashi T., Systematics of Gamma-Ray Energy Spectra for Classification of Workplaces around a Nuclear Facility. *J. Jpn. Health Phys. Soc.*, 1988, vol. 3, pp. 1440–1443.
3. Belanova T.S., Ignatyuk A.V., Pashchenko A.B. *Radiacionnyj zakhvat nejtronov* [Radiative neutron capture]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 248 p. (in Russian).
4. Bermann F. ed. Capture Gamma Ray Beam for the Calibration of Radioprotection Dosimeters between 5 and 9 MeV. *Radiation Protection Dosymetry*, 1990, no. 4, pp. 237–243.

5. Troubetzcoy E., Goldstein H.A. Complication of Information on Gamma-Ray Spectra Resulting from Thermal-Neutron Capture. Oak Ridge National Laboratory, 1960, 78 p.
6. Kroupa M., Granja C., Janout Z. Wide energy range gamma-ray calibration source. *Journal of Instrumentation*, 2011, vol. 6, 12 p. **doi:** 10.1088/1748-0221/6/11/T11002
7. Rogers J.G., Andreaco M.S., Moisan C. A 7-9 MeV isotopic gamma-ray source for detector testing. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1998, vol. 413, pp. 249–254. **doi:** 10.1016/S0168-9002(98)00097-7
8. Briestmeister J.F. ed. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A. Report LA-12625-M, Los Alamos. NM: Los Alamos National Laboratory, 1994, 736 pp.
9. Komar D.I., Kutsen S.A., Guzov V.D. [Monte-Carlo simulation metrological characteristics of the neutron calibration facility]. *Ekologicheskij vestnik* [Ecological proceedings], 2016, no. 3, pp. 54–61 (in Russian).
10. Choi, H.D., Firestone, R.B., Lindstorm, R.B. Database of prompt gamma-rays from slow neutron capture for elemental analysis. Vienna, International atomic Energy Agency, 2006, 252 p.
11. Kopecky J. ed. Atlas of Neutron Capture Cross Sections. Vienna, International atomic Energy Agency, 1997, 370 p.
12. Mashkovich V.P., Kudryavceva A.V. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izluchenij* [Protection of ionizing radiation]. Moscow, Stolitsa Publ., 2013, 494 p. (in Russian).

Anthropometric measurement based on structure from motion imaging technique

Paško S.¹, Sutkowski M.²

¹*Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of Technology,
St. A. Boboli str., 8, 02-525, Warsaw, Poland*

²*Institute of Microelectronics and Optoelectronics, Warsaw University of Technology,
Nowowiejska str., 15/19, 00-665, Warsaw, Poland*

Received 19.10.2015

Accepted for publication 14.11.2016

Abstract

The aim of this work was to estimate limitations related of the actual resolution of images taken into the object reconstruction procedure (using Structure from Motion method) applied for anthropometric measurements. This is necessary to define technical parameters of equipment used for this application.

A series of 42 images of the sample static object were taken with use of high resolution camera. The object was in a stable position, properly illuminated with stable, diffused light sources. With use of VisualSFM software a virtual cloud of points representing real points of examined object was calculated. During tests a resolution of input images were changed then the calculation time and influence of the number of points in the cloud onto deviation of selected anthropometric parameters were analyzed.

In conditions of the performed experiment decreasing of the resolution of input images to the level of 80 % of initial value (or lower) has significant influence onto results of the measurements of selected anthropometric parameters.

Structure from Motion (SfM) technique can be adopted for anthropometric measurement systems when the input images are taken with high resolution imaging device (over a dozen of million pixels). Presented measurement method for anthropometry is characterized by ease of use, do not need any calibration before measurements or specialized equipment. Thank to this can be adopted in practice in any conditions and operated by unskilled operator.

Keywords: structure from motion, anthropometry.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

Адрес для переписки:

Paško S.
Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of
Technology,
St. A. Boboli str., 8, 02-525, Warsaw, Poland
e-mail: s.pasko@mchtr.pw.edu.pl

Address for correspondence:

Paško S.
Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of
Technology,
St. A. Boboli str., 8, 02-525, Warsaw, Poland
e-mail: s.pasko@mchtr.pw.edu.pl

Для цитирования:

Paško S., Sutkowski M.
Anthropometric measurement based on structure from motion imaging
technique.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 305–311.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

For citation:

Paško S., Sutkowski M.
Anthropometric measurement based on structure from motion imaging
technique.
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 305–311.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

Измерения антропометрических параметров на основе технологии визуализации движения

Пасько С.¹, Сутковский М.²

¹Институт микромеханики и фотоники, Варшавский политехнический университет,
ул.св А Боболи, 8, 02-525, Варшава, Польша

²Институт микроэлектроники и оптоэлектроники, Варшавский политехнический университет,
ул. Нововойская 15/19, 00-665 Варшава, Польша

Поступила 19.10.2015

Принята к печати 14.11.2016

Целью данной работы являлась оценка ограничений, связанных с фактическим разрешением изображений, выполненных в процессе реконструкции объекта с использованием технологии визуализации движения в измерение антропометрических параметров. Это необходимо в целях определения параметров аппаратуры, служащей для того же применения.

Посредством цифровой камеры профессионального класса с высоким разрешением была выполнена серия из 42 изображений образца статического объекта. Объект находился в одной и той же точке пространства в устойчивом положении и освещался рассеянным излучением, создаваемым стандартными источниками света со стабильными характеристиками. С использованием программного обеспечения *VisualSFM* была получена совокупность геометрических отсчетов – «виртуальное облако точек», представляющих собой точки, воспроизводимые на исследуемом объекте. В процессе исследований разрешение изображений изменялось, что позволило выявить отклонения выбранных антропометрических параметров и выполнить их анализ.

В условиях проведенного эксперимента уменьшение разрешения входных изображений до уровня 80 % (или больше) от первоначального значения оказывает существенное влияние на результаты измерений выбранных антропометрических параметров.

Технология визуализации движения (SfM) может быть использована для антропометрических измерительных систем, когда входные изображения выполняются с высоким разрешением (более десятка миллионов пикселей). Представленный метод измерения для антропометрии характеризуется простотой использования, не требуется какой-либо калибровки перед измерениями или специализированной аппаратуры. Благодаря этому, может быть принят на практике в любых условиях и управляется неквалифицированным оператором.

Ключевые слова: технология визуализации движения (SfM), антропометрия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

Адрес для переписки:

Paško S.
Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of
Technology,
St. A. Boboli str., 8, 02-525, Warsaw, Poland
e-mail: s.pasko@mchtr.pw.edu.pl

Address for correspondence:

Paško S.
Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of
Technology,
St. A. Boboli str., 8, 02-525, Warsaw, Poland
e-mail: s.pasko@mchtr.pw.edu.pl

Для цитирования:

Paško S., Sutkowski M.
Anthropometric measurement based on structure from motion imaging
technique.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 305–311.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

For citation:

Paško S., Sutkowski M.
Anthropometric measurement based on structure from motion imaging
technique.
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 305–311.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-305-311

Introduction

Anthropometry refers to physical measurements of human individuals for anthropological purposes. In vivo measurements of the parameters instead of classical contact methods can be done *inter alia* by optical way. However the classical optical measurement systems are much more comfortable for the models (patient or examined person) and can produce results of many anthropometric values with high precision they are in general very complicated in construction and operation, moreover are expensive ones. In this paper we are presenting a low-cost optical method applied for measure anthropometric individuals of humans' face (i.e. facial index, nasal index etc.). It is also very simple for operators and do not need any physical calibration procedures. Thanks to the simplicity the measuring stand can be arranged in quite every place and can be performed by unskilled person what makes this system very portable. In the paper we discuss an influence of the image resolution onto calculation time and final results (measured values).

The measurements of anthropometric values of the humans' face are widely used in many different applications, beginning from physical anthropology, medicine (medical analysis, surgery) through security systems (face recognition) to industrial and design (clothing, ergonomics etc.). Most of these values can be determined by use of optical methods [1, 2]. Many of these methods are based on image recognition and image processing. There are divided for two general branches: two-dimensional and 3D data collection [3–5]. Two-dimensional methods are limited by lack of some information (no depth data or only predicted values). However some of the applications can successfully adopt them (i.e. face recognition) they has some limitations (i.e. impossibility of measure of important anthropometric values). Thus a 3D imaging systems are much more suitable but in other hand inconvenient due to the necessity of complex build and calibration procedures.

In the paper a very simple imaging system with no calibration demand for anthropometry is presented. The system is based on widely known Structure from Motion (SfM) technique [6–9]. With use of SfM reconstruction of shape of the object from multiple camera views can be realized. The SfM theorem assume unknown or partially unknown parameters of the camera which may change in time additionally. Having a set of n images taken from m fixed 3D points SfM estimate n projection

matrices and thus an estimated 3D points cloud of the object can be achieved (see Figure 1). The relative coordinates of the object's points can be determined and consequently relative geometrical values calculated. However in this method there is a kind of latitude allowed during measurements (no need of any additional procedures, adjustments nor calibration), SfM charges main computer performing necessary calculations very hardly.

In the application when determination of the geometrical values is needed (as in this case) the most important is to achieve as good reconstruction quality as possible to achieve best possible representation of the real world in the reconstructed scene. The number of points in a cloud in the reconstructed model in SfM method determines how precise the real object is reconstructed and is related to the resolution of the input images. The greater the number of points in the reconstructed cloud the higher accuracy is achieved. This in turn is strictly dependent on the quality of recorded images (due to a number of factors, including the number of pixels of input images).

In typical applications, the SfM method uses of images in which the number of pixels ranges from 1 to 5 mega pixels. We decided use for the collection of input images a much larger number of them – images were recorded by detector with approx. 24 million of effective pixels. Then reduction of the resolution of the input images were made to determine what the minimum number of pixels is needed to determine the correct quantity of geometric parameters registered object (parameters of the face). This is of practical importance because the reduction of the number of points is reflected in a strong reduction of processing time. In future studies, where research will be attended by more people calculation time has important practical significance.

The goal of this work is to adopt Structure from Motion technique as a tool for determination of anthropometric parameters. This kind of SfM application was never performed before. The Authors define requirements needed for use SfM in this application and verify influence of the resolution of the input images onto uncertainty of the determination of the coordinates of measured points – what in consequence will cause measurement uncertainties.

A series of images taken from fixed points (on the figure points P1, P2, P3 shows few selected camera positions only) is needed. Numerical calculations allow to determine relative 3D coordinates of the object's points. Collecting data of many points lead to shape reconstruction [12].

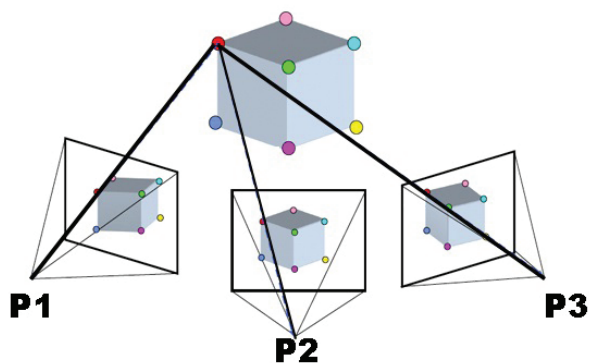


Figure 1 – The basic idea of object's point estimation with use of SfM (by commons.wikimedia.org)

Shape reconstruction

Experimental set-up used in our experiment consists of the consumer type digital photographic camera (Nikon D610, full frame sensor, 24.3 million of effective pixels) with varifocal lens (Nikkor 24–85 mm) and a diffused light source (for proper and shadow free illumination of the object). A model (patient or examined person) was in a stable position on a backed chair.

For the measurements is needed to take a series of pictures from different points of view with constant exposure value and focal point placed at the object (patient or examined person). In general the more picture is taken from different angles and the better resolution of the input images the more precise shape reconstruction can be done but in consequence the more calculation time is needed. The goal of the experiment is to determine the influence of the pixel count of the corresponding series of input images on the final results of the measurements in the optical set-up for anthropometric measurements.

A series of 42 pictures with constant exposure conditions (i.e. aperture $f/5.6$, exposure time $t = 1/60$ s, equiv. ISO = 1600, focal length $f = 50$ mm) from different positions were done. In the field of view a standard pattern with series of squares was placed used for absolute geometrical dimensions determination. Pictures were recorded as a RAW type (NEF) files with native camera resolution (6016×4016 pixels). Image data was processed with use of Adobe Photoshop Lightroom post-processing software. The images was sampled from RAW data to different final resolution described in percentage values of initial pixel count. As a result it was achieved a series of identical images differing only in pixel count was achieved.

To avoid possible differences in object's points determination during experiment a special circular

markers were placed on the object (patient or examined person). Obviously these markers are needless when the anthropometric measurements would be performed and was applied only for these tests.

The schematic diagram of the experimental set-up is shown on Figure 2.



Figure 2 – Experimental set-up for anthropological values determination with use of Structure from Motion (SfM). *Obj.* – position of the object (patient or examined person); $P_1, \dots, P_n$ – points where the consequent images was taken from (for convenience only start-point and end-point are marked)

Taken images were directed to the reconstruction software which in this case was a VisualSFM v 0.5.25 [10, 11]. The calculation was performed on the PC-machine equipped with CPU Intel Core i5 M520@2.40GHz, memory RAM 8GB and operating system Windows 8.1 Pro 64-bit. A series of 42 images was enough to make reconstruction of the 3D model of the scene. Resulting model is shown in Figure 3. The calculation time as a function of final pixel count are shown in the Table and Figure 4.



Figure 3 – Reconstructed model with use of SfM method. The standard pattern is shown on the image on the right, it was present in the scene and used for absolute dimensions determination. On the image applied markers placed on the object (patient or examined person) are visible

As expected the calculation time dramatically decreases with smaller image resolution, starting from over 45 min to a little bit over 4 min. With the decreasing number of pixels of the input images a final

number of the reconstructed points also decreased starting from approx. 625k points to 68k points. This is shown in the Table.

As a result of the experiment we took some exemplary measurements. Employing sample points (markers) on the patient's face exemplary distances in vertical and horizontal directions were determined in a function of initial resolution of series of images taken for SfM reconstruction. It is shown on Figure 5 and Figure 6. The distances between consecutive markers taken from the cloud of points with highest density (marked as 100 %) were assigned as a reference value. Results are shown as absolute difference to this reference. As shown a difference does not exceed a level of 2 mm when the initial resolution is 80 % or higher. When density of the cloud decreases measured distances has more uncertainty, achieving quite $\Delta = 8$ mm at the worst case. Such big uncertainty is caused by errors of the reconstruction. The more points are reconstructed in the cloud the more precise determination of the coordinates of the markers can be done and the final results in measurements are better.

In the experiment the number of the points in the cloud after reconstruction was decreased dramatically (approx. by the factor of 9, as a result of decrease of the resolution of the input images) and causes that some points are not present in the reconstructed model and thus precise determination of the coordinates of some markers is impossible. In consequence, the quality of the reconstruction has a major influence on the usefulness of the SfM method in this application.

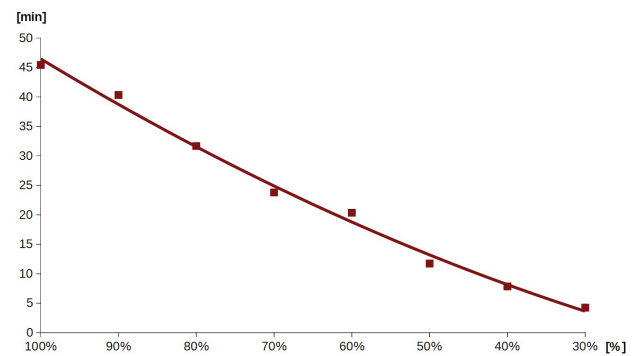
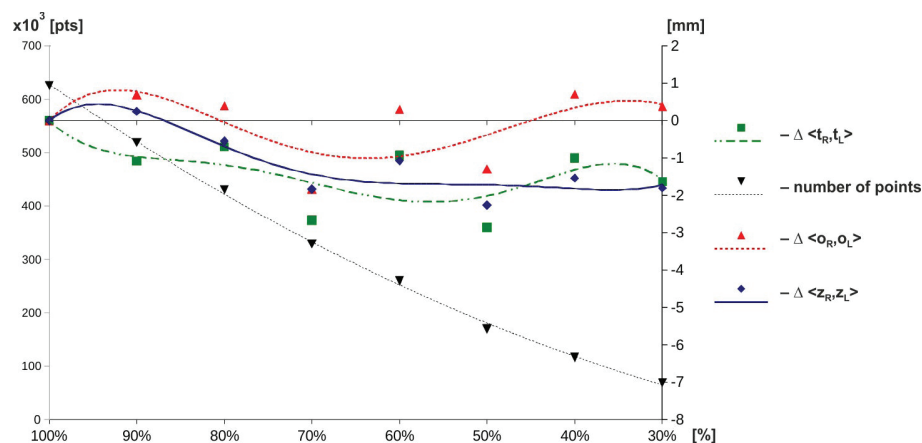


Figure 4 – Dependence of calculation time vs initial images resolution

Table

Influence of input images resolution on measured values of calculation time and the number of reconstructed points in the cloud. Resolution is shown as a resulting pixel count of camera «native» resolution (6016×4016 pixels – 24.16 million of pixels). In the brackets – relative change of the parameter

Image resolution (relative)	Points in the cloud [10^3]	Calculation time [min]
30 %	68 770 (11 %)	4,25 (9 %)
40 %	116 252 (19 %)	7,85 (17 %)
50 %	169 741 (27 %)	11,73 (26 %)
60 %	259 179 (41 %)	20,35 (45 %)
70 %	328 401 (52 %)	23,8 (52 %)
80 %	430 521 (69 %)	31,68 (70 %)
90 %	518 622 (83 %)	40,33 (89 %)
100 %	625 754 (100 %)	45,43 (100 %)



a

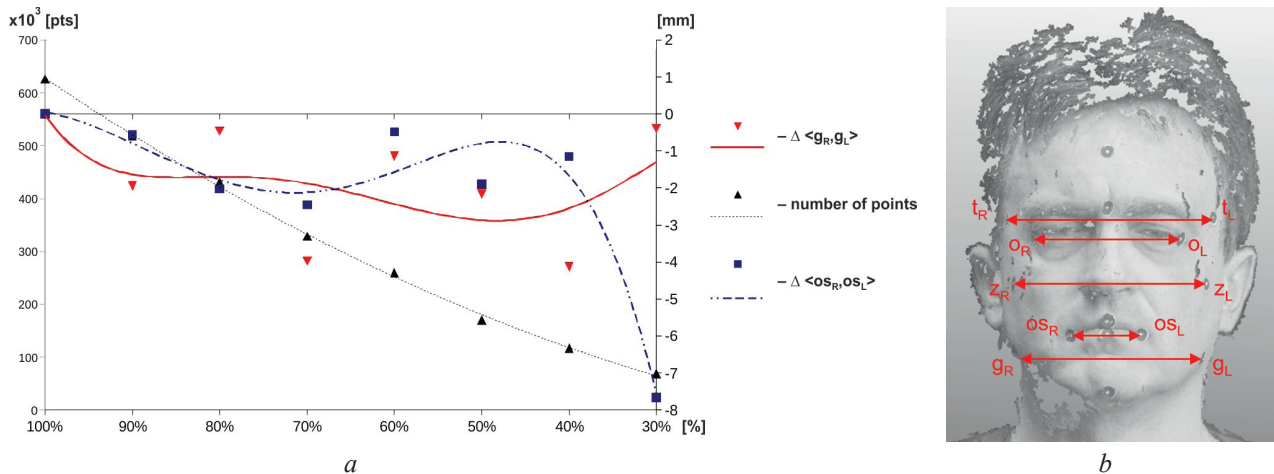


Figure 5 – Results of the determination of horizontal distances on the objects (face) – *a, b*. Selected anthropometric points were marked and exemplary dimensions were determined – *c*. *R, L* indices – denotes right or left respectively; *t* – tempus (temple); *O* – oculus (eye); *Z* – zygoma (zygomatic arche); *OS* – oris (mouth edge); *g* – angulus (gonial angle)

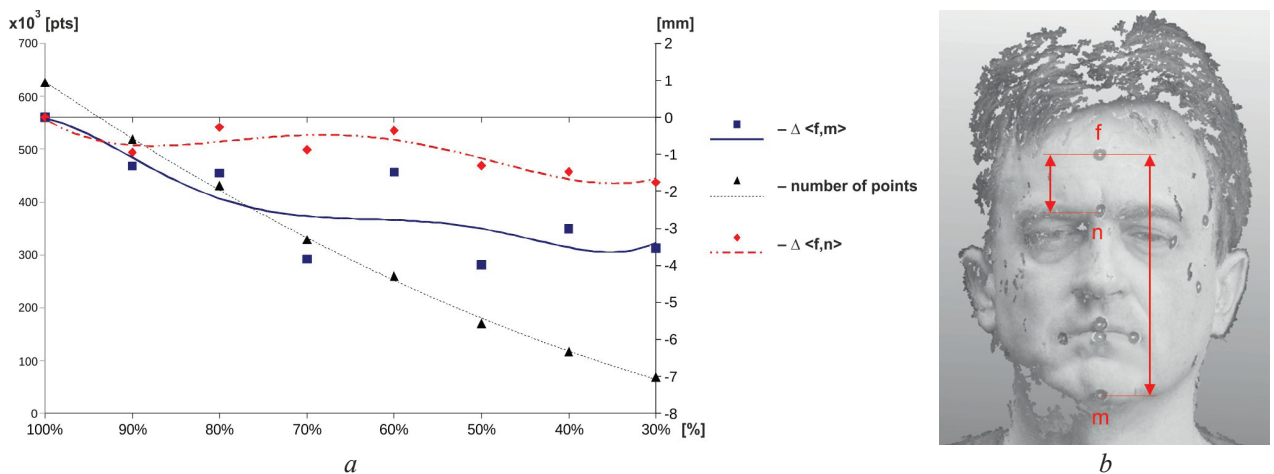


Figure 6 – Results of the determination of vertical distances on the objects (face) – *a*. Selected anthropometric points were marked and exemplary dimensions were determined – *b*. *R, L* indices – denotes right or left respectively; *m* – mentum (chin); *n* – nasus (nose); *f* – frontis (frontal bone)

Conclusion

In the paper a simple, non-invasive and rapid method of reconstruction of the human body shape (head as an example) is presented. Thanks to its simplicity it do not demand any complicated operation nor calibration before data collection. The only need is to maintain fixed focal plane during image acquisition and constant exposure. In other hand mentioned advantages requires engagement of relatively complicated numerical procedures and thus needs powerful hardware for analysis (computers) and/or relatively long time for calculation. As a result we achieve a 3D data (shape) which allow to determine relative coordinates (*x, y, z*) of the selected points on the examined object.

When in the scene the standard pattern is present as a reference the absolute geometrical values can be

determined and thus real distances between marked points can be calculated.

The resolution of the initial images has major influence of the measure uncertainty. The lower resolution of the input images the lower number of points in the cloud (of the reconstructed object) can be calculated. And in consequence the smallest distance possible to measure is dramatically increasing and the measurement error also increases. This is the price to pay when the system has to work faster. But it has been shown that from a practical point of view, in many applications, it is not necessary to use as high resolution matrices as used here, since calculation time increases disproportionately with respect to the advantages it brings more accurately reconstructed model. In the case of experiment presented in this paper the reduction of the number of pixels in reconstructed model shows approximately

proportional influence on the reduction of calculation time.

In practice Authors can recommend to use in the proposed application input images with resolution of 20 million of pixels or better. Thus the reconstruction consists of more number of points in the cloud (in our case more than 430 million of points) and precision of the determination of the coordinates of the markers can be satisfactory.

Thanks to the simplicity the SfM is also suitable for design and ergonomic engineering. In some of the applications the possible higher error in the measurements can be accepted and the initial images can be taken with smaller resolution and the final results can be reached quicker.

References

1. Xu B., Yu W., Yao M., Reese Pepper M., Freeland-Graves J. H. Three-dimensional surface imaging system for assessing human obesity. *Opt. Eng.*, 2009, October, vol. 48, no. 10, nihpa156427. **doi:** 10.1117/1.3250191
2. Stancic I., Supuk T., Cecic M. Computer vision system for human anthropometric parameters estimation. *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, 2009, iss. 3, vol. 8, pp. 430–439.
3. Enciso R., Shaw A., Neumann U., Mah J. 3D head anthropometric analysis. *Proc. SPIE 5029. Medical Imaging 2003: Visualization, Image-Guided Procedures and Display*, 590. **doi:** 10.1117/12.479752
4. Davis J.P., Valantine T., Davis R.E. Computer assisted photo-anthropometric analyses of full-face and profile facial images. *Forensic Sci Int.* 2010 Jul 15, vol. 300, no. 1–3, pp. 165–176. **doi:** 10.1016/j.forsciint.2010.04.012
5. Smeets D., Claes P., Vandermeulenb D., Clementa J. G. Objective 3D face recognition: Evolution, approaches and challenges. *Forensic Sci Int.*, 2010 Sep 10; vol. 201, no. 1–3, pp. 125–132. **doi:** 10.1016/j.forsciint.2010.03.023
6. Fitzgibbon A.W., Zisserman A. Automatic camera recovery for closed or open image sequences. *Computer Vision – ECCV'98*, vol. 1406 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp. 311–326. **doi:** 10.1007/BFb0055675
7. Muhamad S., Hebert M. Iterative projective reconstruction from multiple views. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '00)*. 2000, June, vol. 2, pp. 430–437.
8. Faugeras O., Luong Q.T., Papadopoulos T. The geometry of multiple images, The MIT Press, 2001.
9. Liu L., Stamos I., Yu G., Wolberg G., Zokai S. Multiview geometry for texture mapping 2D images onto 3D range data. *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*. 2006, IEEE Computer Society Conference, 2006, vol. 2, pp. 2293–2300. **doi:** 10.1109/CVPR.2006.204
10. Wu Ch. Towards Linear-time Incremental Structure From Motion. *Proceedings of the 2013. International Conference on 3D Vision*. IEEE Computer Society Washington, DC, pp. 127–134. **doi:** 10.1109/3DV.2013.25
11. Wu Ch. VisualSfM: A Visual Structure from Motion System [Website of Synkera Technologies, Inc.]. Available at: <http://ccwu.me/vsfm/> (accessed 31.10.2016).
12. [Website of Synkera Technologies, Inc.]. Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sfm1.jpg> (accessed 20.02.2016).

УДК 537.311.6

Импедансная спектроскопия поликристаллических пленок диоксида олова

Адамчук Д.В., Ксенович В.К., Горбачук Н.И., Шиманский В.И.

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

Поступила 17.08.2016

Принята к печати 15.11.2016

Целью работы являлось применение метода импедансной спектроскопии для анализа влияния отжига в инертной среде на электрофизические свойства и структуру нестехиометрических пленок диоксида олова.

Пленки SnO_2 варьированного стехиометрического состава получали двухступенчатым окислением металлического олова, нанесенного на подложки поликристаллического Al_2O_3 методом магнетронного напыления на постоянном токе. Для модификации структуры и стехиометрического состава исходных покрытий проводился отжиг в инертной среде в интервале температур 300–800 °С. Измерения импеданса полученных пленок SnO_2 проводились в диапазоне частот 20 Гц – 2 МГц при комнатной температуре на воздухе.

Исследование электропроводности пленок диоксида олова на переменном токе позволило установить, что в результате высокотемпературного отжига происходит изменение частотных зависимостей действительной и мнимой частей импеданса пленок. Предложены эквивалентные схемы замещения, описывающие частотные зависимости импеданса пленок различного структурного и стехиометрического состава. Использование метода импедансной спектроскопии позволило установить, что в процессе окислительного отжига формируется поликристаллическая пленка диоксида олова, электропроводность которой можно варьировать отжигом в инертной среде, в результате которого происходит перекристаллизация пленок и изменение ее стехиометрического состава, а также увеличение размеров кристаллитов SnO_2 . Изменения структуры и фазового состава пленок диоксида олова при проведении высокотемпературного отжига в инертной среде подтверждаются результатами проведенного рентгеноструктурного анализа.

Установлено, что анализ годографов импеданса является информативным способом для исследования электрофизических свойств и структуры поликристаллических пленок диоксида олова.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, нестехиометрические пленки диоксида олова, высокотемпературный отжиг, рентгеноструктурный анализ.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

Адрес для переписки:

Ксенович В.К.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: ksenevich@bsu.by

Address for correspondence:

Ksenevich V.K.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: ksenevich@bsu.by

Для цитирования:

Адамчук Д.В., Ксенович В.К., Горбачук Н.И., Шиманский В.И.
Импедансная спектроскопия поликристаллических пленок диоксида олова.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 312–321.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

For citation:

Adamchuck D.V. Ksenevich V.K. Gorbachuk N.I., Shimanskij V.I.
[Impedance spectroscopy of polycrystalline tin dioxide films].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 312–321 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

Impedance spectroscopy of polycrystalline tin dioxide films

Adamchuck D.V. Ksenevich V.K. Gorbachuk N.I., Shimanskij V.I.

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

Received 17.08.20165
Accepted for publication 15.11.2016

Abstract

The aim of this work is the analysis of the influence of annealing in an inert atmosphere on the electrical properties and structure of non-stoichiometric tin dioxide films by means of impedance spectroscopy method.

Non-stoichiometric tin dioxide films were fabricated by two-step oxidation of metallic tin deposited on the polycrystalline Al_2O_3 substrates by DC magnetron sputtering. In order to modify the structure and stoichiometric composition, the films were subjected to the high temperature annealing in argon atmosphere in temperature range 300–800 °C. AC-conductivity measurements of the films in the frequency range 20 Hz – 2 MHz were carried out.

Variation in the frequency dependencies of the real and imaginary parts of the impedance of tin dioxide films was found to occur as a result of high-temperature annealing. Equivalent circuits for describing the properties of films with various structure and stoichiometric composition were proposed. Possibility of conductivity variation of the polycrystalline tin dioxide films as a result of annealing in an inert atmosphere was demonstrated by utilizing impedance spectroscopy. Annealing induces the recrystallization of the films, changing in their stoichiometry as well as increase of the sizes of SnO_2 crystallites. Variation of electrical conductivity and structure of tin dioxide films as a result of annealing in inert atmosphere was confirmed by X-ray diffraction analysis.

Analysis of the impedance diagrams of tin dioxide films was found to be a powerful tool to study their electrical properties.

Keywords: impedance spectroscopy, nonstoichiometric tin dioxide films, high-temperature annealing, X-ray diffraction analysis.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

Адрес для переписки:

Ксеневиц В.К.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: ksenevich@bsu.by

Address for correspondence:

Ksenevich V.K.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: ksenevich@bsu.by

Для цитирования:

Адамчук Д.В., Ксеневиц В.К., Горбачук Н.И., Шиманский В.И.
Импедансная спектроскопия поликристаллических пленок диоксида олова.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 312–321.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

For citation:

Adamchuck D.V. Ksenevich V.K. Gorbachuk N.I., Shimanskij V.I.
[Impedance spectroscopy of polycrystalline tin dioxide films].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 312–321 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-312-321

Введение

Импедансная спектроскопия является эффективным методом для изучения электрофизических характеристик различных материалов: кристаллических и неупорядоченных полупроводников, гетерогенных систем, композиционных структур [1]. Проведение измерений электропроводности на переменном токе позволяет, в частности, изучать электрохимические и электрофизические процессы в ионопроводящих материалах, исследовать особенности диффузионного транспорта носителей заряда в неупорядоченных системах, определять характеризующие электронный транспорт параметры.

Существенное преимущество импедансной спектроскопии заключается в том, что она является неразрушающим методом измерений, использующим относительно несложное и недорогое оборудование, обеспечивая при этом достаточную для практических целей погрешность эксперимента. Зависимости действительной и мнимой частей импеданса от частоты поликристаллических материалов определяются преимущественным механизмом электронного транспорта [2], который в значительной мере зависит от их стехиометрического состава и кристаллической структуры. Проводимость поликристаллических материалов определяется как объемными характеристиками зерен (стехиометрическим и фазовым составом, наличием примесей [3–4]), так и состоянием межзеренных границ и может быть рассмотрена как сумма электропроводностей, характеризующихся различными механизмами транспорта заряда [5–8]. Также не менее важную роль в процессах электропереноса в этих материалах играет наличие в поликристаллических оксидах разброса высот барьеров, обусловленного вариациями размеров и форм микрокристаллов, неоднородным распределением дефектов и примесей по поверхностям и объемам микрокристаллов.

Анализ годографов импеданса в рамках метода эквивалентных схем позволяет для поликристаллических материалов разделить вклады в проводимость от межкристаллитных границ и объема зерен [8]. Следует отметить, что эта проблема не является простой ввиду наличия многих факторов, способных повлиять на механизм проводимости нестехиометрической пленки в целом [2]. Количественный анализ частотной зависимости импеданса на основе выбранной эквивалентной схемы позволяет интерпретировать ее

элементы в соответствии с физико-химическими процессами в образцах при протекании в них электрического тока.

Диоксид олова является одним из наиболее распространенных прозрачных проводящих металлооксидных материалов, который наряду с хорошей электрической (близкой к металлической) проводимостью и прозрачностью в видимом диапазоне спектра характеризуется также высокой химической стойкостью. Поэтому пленки SnO_2 широко используются в качестве прозрачных электродов в светодиодах, жидкокристаллических дисплеях, солнечных элементах и др. [9–11]. Кроме того, в силу высокой адсорбционной и реакционной способности поверхности диоксида олова он является перспективным материалом для создания газовых сенсоров, сигнал в которых вызван изменением концентрации носителей заряда в приповерхностном слое [12].

Как правило, синтезируемый различными методами диоксид олова характеризуется поликристаллической структурой и обладает проводимостью n -типа. Роль мелких доноров в нем так же, как и в некоторых других металлооксидных полупроводниках, играют кислородные вакансии [7]. Как показано в [7, 10], кристаллы SnO_2 содержат вакансии кислорода с различными уровнями энергии в запрещенной зоне полупроводника: 10–40 мэВ, 24 ± 4 мэВ, 60 мэВ, 150 мэВ [10], 15–49 мэВ [7]. Проводимость поликристаллических пленок SnO_2 обусловлена переносом электронов между кристаллитами оксида и определяется высотой потенциальных барьеров между ними, а также концентрацией электронов проводимости вблизи границ кристаллитов.

В силу того, что электропроводность поликристаллического диоксида олова существенно зависит от размера зерен и их стехиометрического состава, разработка технологических методов управляемого варьирования этих параметров является важной задачей для дальнейшего применения SnO_2 в качестве сенсоров и прозрачных проводящих материалов. Одним из наиболее эффективных методов модификации электрических свойств диоксида олова является варьирование температуры отжига в процессе синтеза пленок, а также их дополнительная термообработка в кислородсодержащих и инертных средах при различных температурах [13].

Целью работы являлось применение метода импедансной спектроскопии для анализа влияния отжига в инертной среде на электрофизиче-

ские свойства и структуру нестехиометрических пленок диоксида олова.

Получение образцов и методики измерений

Тонкие пленки SnO_2 получали методом магнетронного напыления олова на постоянном токе в плазме аргона с последующим отжигом на воздухе. Напыление производилось на подложки поликристаллического Al_2O_3 с использованием установки ВУП – 5М при токе разряда 4 мА и напряжении разряда 200 В в течение 30 мин. В качестве мишени использовалось металлическое олово чистотой не менее 99,99 %. После напыления полученные пленки олова подвергали двухстадийному окислительному отжигу на воз-

духе. Первая стадия включала отжиг при температуре 200 °С (около точки плавления Sn) в течение 2 ч. Вторая стадия заключалась в нагреве до температуры 500 °С и изотермическом отжиге в течение 1 ч. Двухстадийный отжиг в окислительной атмосфере позволяет получить имеющие поликристаллическую структуру проводящие пленки, в состав которых входит диоксид олова орторомбической и тетрагональной модификаций, монооксид олова и нестехиометрические фазы диоксида олова [14]. Затем полученные пленки подвергались отжигу в инертной среде в температурном интервале 300–800 °С.

Краткое описание режимов отжига и условные обозначения образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Режимы отжига и обозначение образцов Annealing temperatures and designation of samples

Обозначение образцов Designation of samples	Температуры отжига / Annealing temperatures
S1	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours)
S2	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 300 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 300 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar
S3	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 400 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 400 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar
S4	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 500 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 500 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar
S5	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 600 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 600 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar
S6	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 700 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 700 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar
S7	Отжиг на воздухе (200 °С в течение 2 ч и 500 °С в течение 1 ч) с последующим отжигом при 800 °С в среде аргона при давлении 10^{-4} Бар Annealing in air (200 °С for 2 hours and 500 °С for 1 hours) with the following annealing at 800 °С in argon at the pressure of 10^{-4} bar

Измерения импеданса $Z = Z' + iZ''$ пленок SnO_2 в диапазоне частот $f = 20$ Гц – 2 МГц проводились измерителем *LCR Agilent E4980A* при амплитуде напряжения синусоидального сигнала 40 мВ при комнатной температуре на воздухе. Одновременно на образцы подавалось напряжение постоянного смещения в диапазоне 0–5 В. Проведение измерений при наличии постоянного напряжения смещения необходимо для разделения вкладов в импеданс от межкристаллитных барьеров и транспорта заряда через объем кристаллита. Аппроксимация результатов измерений проводилась в программе *EIS Spectrum Analyser 1.0*.

Рентгеноструктурный анализ исходных пленок диоксида олова, а также пленок, отожженных при различных температурах в атмосфере аргона, проведен с помощью рентгеновского дифрактометра *Ultima IV RIGAKU* в конфигурации параллельного пучка с использованием монохроматизированного медного излучения $\text{CuK}\alpha$ (0.15406 нм) и высокоскоростного рентгеновского детектора *D/teX*.

Обсуждение экспериментальных результатов

В результате исследования электропроводности пленок на переменном токе было обнаружено, что отжиг в инертной среде в интервале температур 300–700 °С приводит к изменению величин как действительной, так и мнимой частей их импеданса, однако частотные зависимости $Z'(f)$ и $Z''(f)$ имеют схожий вид для всех образцов S1–S6 и могут быть промоделированы одной и той же эквивалентной схемой (ЭС) замещения, включающей последовательно соединенные резистор $R1$ и контур $R2$ – CPE , в котором резистор $R2$ и элемент постоянной фазы (constant phase element) CPE включены параллельно. Зависимости $Z'(f)$ и $Z''(f)$ для образца S1 и результаты их аппроксимации показаны на рисунке 1. Как видно, на графиках $Z'(f)$ и $Z''(f)$ можно выделить низкочастотные участки, на которых наблюдается слабая зависимость как действительной, так и мнимой частей импеданса от частоты переменного тока. В высокочастотной области происходит спад величины Z' , который сопровождается возрастанием мнимой части импеданса Z'' на кривой $Z''(f)$. Увеличение напряжения постоянного смещения приводит к повышению проводимости пленок, а также к сдвигу областей спада Z' и увеличения Z'' в высокочастотную область.

Как известно, при моделировании электропроводности на переменном токе поликристаллических полупроводников для учета влияния проводимости и емкости как кристаллитов, так и границ зерен может быть использована эквивалентная схема замещения, в состав которой входят два последовательно соединенных контура, каждый из которых состоит из параллельно включенных резистора и конденсатора и характеризуется своей постоянной времени $\tau = RC$ [8, 15].

В нашем случае можно предположить, что на эквивалентной схеме замещения усредненное значение сопротивления кристаллитов моделируется элементом $R1$, а усредненное значение сопротивления границ зерен – элементом $R2$. Отсутствие на ЭС емкости, характеризующей реактивное сопротивление кристаллитов, связано с шунтированием ее активным сопротивлением кристаллитов в исследуемой области частот 20 Гц – 2 МГц.

Использование элемента постоянной фазы CPE вызвано необходимостью учета разброса значений сопротивлений межзеренных границ и их емкостей. Импеданс данного элемента определяется следующей формулой [1]:

$$Z = A^{-1} (i\omega)^{-n},$$

где A – фактор пропорциональности, размерность которого зависит от экспоненциального показателя n . Если $n = 1$, то элемент CPE тождествен конденсатору и A_0 имеет размерность емкости, а если $n = 0$, то — резистору и A имеет размерность сопротивления. В «промежуточном» случае можно считать, что A имеет размерность $\Omega^{-1} \cdot \text{с}^n$ [16].

Следует отметить, что данный элемент не имеет строго определенного физического смысла и является обобщенным и универсальным средством для моделирования импеданса обширного класса систем с различной микроструктурой, в частности для поликристаллических пленок [1]. Кроме того, применение элемента постоянной фазы целесообразно в случае неидеального конденсатора, т.е. когда распределение примесных и дефектных центров неоднородно по толщине оксида [17].

Значения рассчитанных элементов эквивалентных схем замещения для образцов S1 – S6 представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, для показателя степени n CPE -элемента в результате моде-

лирования были получены значения, близкие к 1 (в диапазоне 0,88–0,95) для всех образцов, т.е. импеданс данного элемента тождествен импедансу конденсатора. Сравнимые по порядку величины значений фактора пропорциональности A для всех образцов S1–S6 могут свидетельствовать о примерно одинаковых средних размерах кристаллитов в данных пленках.

Важно отметить, что отжиг пленок диоксида олова в атмосфере аргона в интервале температур 300–700 °С в течение 1 ч не при-

водит к существенному изменению действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса, а также параметров эквивалентной схемы замещения. Поэтому можно предположить, что относительно незначительное варьирование этих параметров при увеличении температуры отжига связаны с изменением стехиометрического состава кристаллитов. Уменьшение импеданса при приложении напряжения постоянного смещения объясняется понижением высоты контактного барьера между кристаллитами.

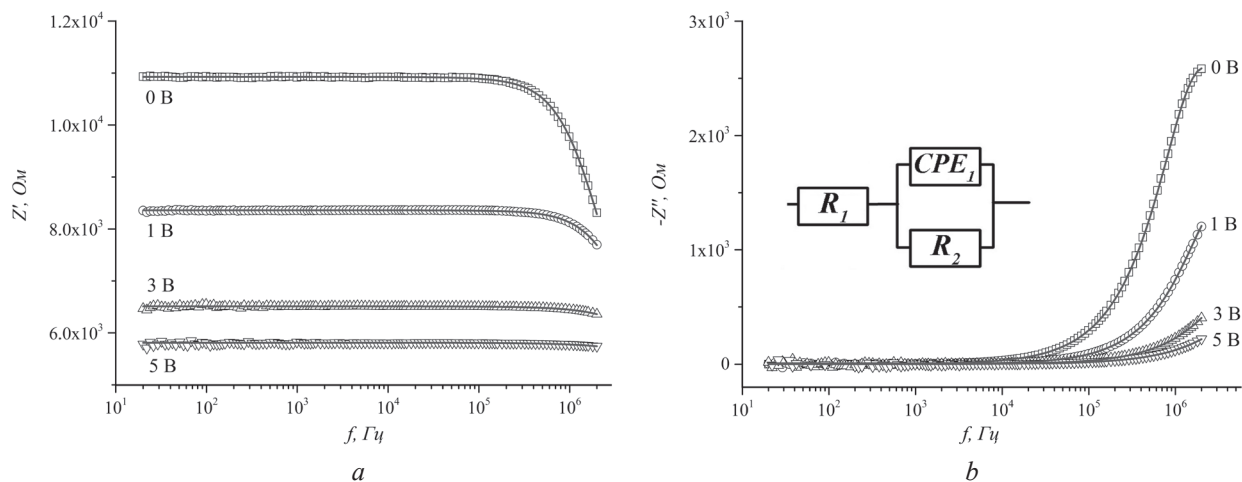


Рисунок 1 – Зависимости действительной Z' (a) и мнимой Z'' (b) частей импеданса от частоты переменного тока f для образца S1. На вставке к рисунку (b) показана эквивалентная схема замещения для образцов S1–S6

Figure 1 – The dependences of real Z' (a) and imaginary Z'' (b) components of impedance on AC current frequency f for the sample S1. Equivalent circuit for the samples S1–S6 is shown on the inset to figure (b)

Таблица 2/Table 2

Значения параметров эквивалентной схемы замещения для образцов S1–S6

The values of parameters of the equivalent circuit elements for S1–S6 sample

Параметр Parameter	S1	S2	S3	S4	S5	S6
R1	5376	22387	10188	8204	22241	10313
R2	5549	7819	5107	2165	7301	2356
CPE	A	2.79E-11	1.39E-10	1.16E-10	7.11E-11	3.43E-11
	n	0.956	0.863	0.919	0.941	0.882

При увеличении температуры отжига в инертной среде до 800 °С частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса, которые показаны на рисунках 2a и 2b, претерпевают существенные изменения. Во-первых, происходит значительное (почти на два порядка по величине) увеличение значений Z' и Z'' . Во-вторых, на зависимостях $Z'(f)$ (измеренных без постоянного смещения и при значениях постоянного смещения в интервале 0–5 В) наблюдаются два «плато»

и две области быстрого спада значения Z' . Соответственно на зависимостях $Z''(f)$ наблюдается 2 максимума, второй из которых смещается в высокочастотную область и уменьшается при увеличении напряжения постоянного смещения. При напряжении постоянного смещения 5 В на зависимости $Z'(f)$ исчезает участок первого плато, а на зависимости $Z''(f)$ – низкочастотный максимум. Построенный по зависимостям $Z'(f)$ и $Z''(f)$ годограф импеданса для образца S7 показан на рисун-

ке 2с и представляет собой две полуокружности. При напряжении постоянного смещения 5 В одна из полуокружностей практически исчезает.

В результате аппроксимации частотных зависимостей действительной и мнимой частей импеданса установлено, что экспериментальные результаты могут быть промоделированы при помощи эквивалентной схемы замещения, включа-

ющей два контура. Первый из контуров состоит из резистора R_1 и конденсатора C_1 , моделирующих усредненное сопротивление и емкость кристаллитов, а второй — из резистора R_2 и элемента постоянной фазы CPE , которые характеризуют усредненные значения сопротивления и емкости границ зерен (с учетом разброса их величин). Значения параметров ЭС представлены в таблице 3.

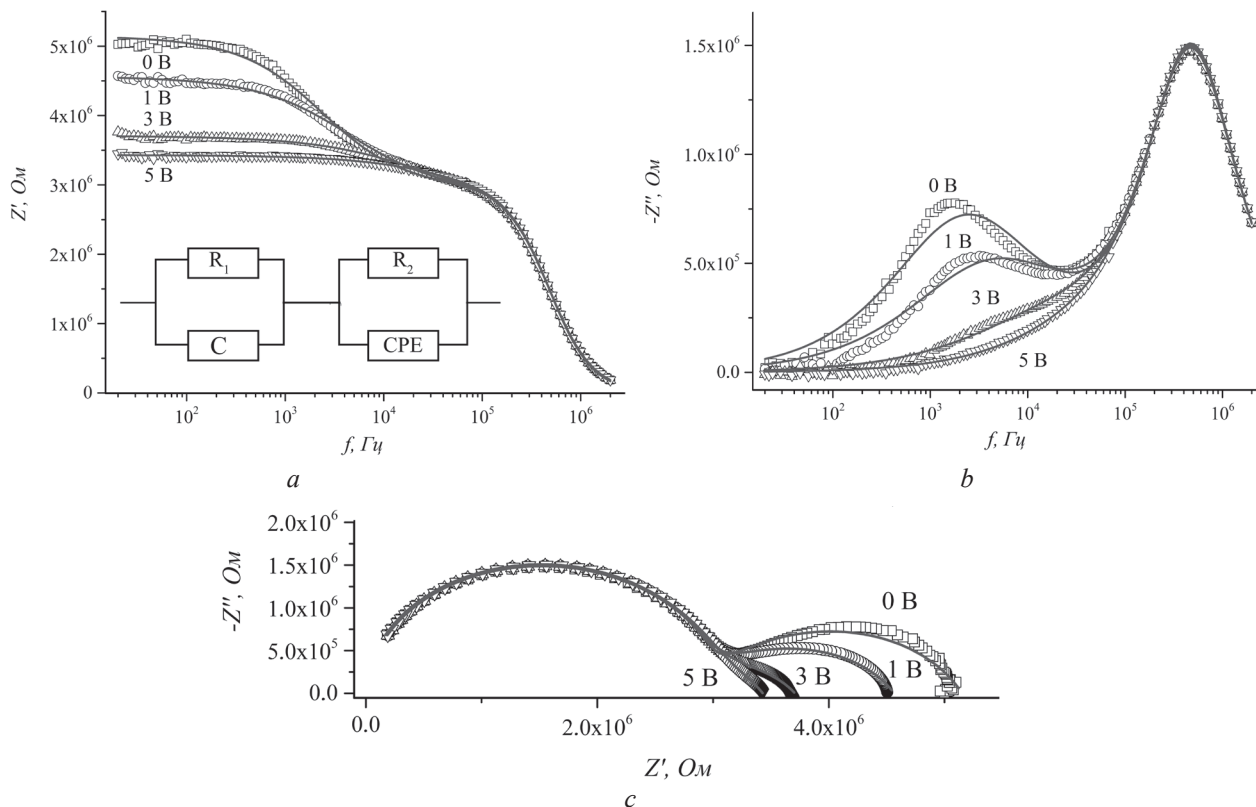


Рисунок 2 – Зависимости действительной (а), мнимой (b) частей импеданса от частоты переменного тока и годограф импеданса (c) для образца S7. На вставке к рисунку (a) показана эквивалентная схема замещения для образца S7

Figure 2 – The dependences of real Z' (a) and imaginary Z'' (b) components of impedance on AC current frequency f and impedance diagram (c) for the sample S7. Equivalent circuit for the sample S7 is shown on the inset to figure (a)

Таблица 3/Table 3

Значения параметров эквивалентной схемы замещения для образцов S1–S6

The values of parameters of the equivalent circuit elements for S1–S6 sample

Параметры эквивалентной схемы	Напряжение смещения				
	Bias voltage				
Parameters of equivalent circuit	0 В	1 В	3 В	5 В	
$C1$	1.1276E-13	1.1374E-13	1.1702E-13	1.1715E-13	
$R1$	2.9357E06	2.8924E06	2.8019E06	2.8032E06	
$R2$	2.2152E06	1.6722E06	9.0578E05	6.2681E05	
CPE	A	4.2441E-10	5.7202E-10	7.0145E-10	4.3175E-10
	n	0.72543	0.67971	0.62693	0.64934

Существенное увеличение импеданса для образца *S7* по сравнению с образцами *S1–S6* свидетельствует об увеличении роли межкристаллитных барьеров и уменьшении концентрации свободных носителей заряда в пленках. Постоянное напряжение смещения понижает сопротивление межкристаллитных барьеров, и при величине $U = 5$ В основной вклад в импеданс вносит сопротивление кристаллитов. Таким образом, по результатам анализа годографов импеданса можно предположить, что высокотемпературный отжиг в инертной среде приводит к частичной рекристаллизации пленок, что сказывается на вкладе межкристаллитных барьеров в эффективную проводимость образцов. Возможным является также изменение фазового состава пленок.

Для исследования изменений структуры нестехиометрических пленок диоксида олова в процессе отжига в инертной среде и подтверждения ее влияния на импеданс образцов проводился рентгеноструктурный анализ. На рисунке 3 показаны результаты анализа фазового состава пленок, подвергнутых термообработке при различных температурах.

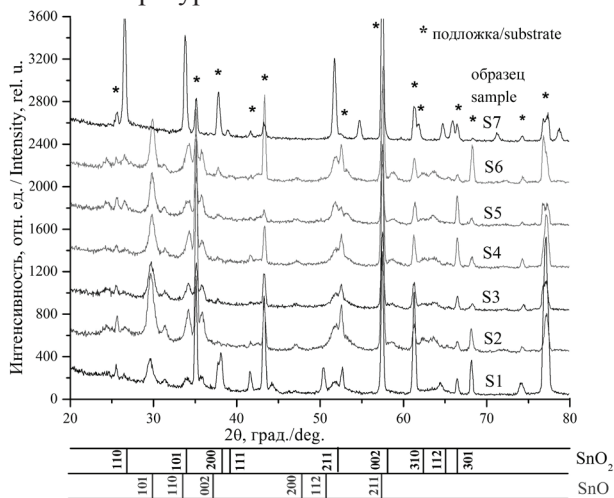


Рисунок 3 – Участки рентгенограмм образцов *S1–S7*
Figure 3 – X-ray diffraction patterns for samples *S1–S7*

На представленных рентгенограммах, полученных от пленок, не подвергнутых термическому отжигу, обнаружены совокупности дифракционных рефлексов, соответствующих как монооксиду олова SnO тетрагональной структуры, так и диоксиду олова SnO_2 тетрагональной структуры типа рутила [18–21].

После проведения термического отжига в арго-не в интервале температур 300–700 °С наблюдается угловое смещение дифракционных максимумов монооксида олова SnO , свидетельствующее об из-

менении параметров решетки, которое может быть обусловлено отклонением элементного состава от стехиометрического ввиду диффузионного перераспределения кислорода от поверхности вглубь пленки. При этом наблюдается повышение интенсивности дифракционных линий диоксида олова SnO_2 , указывающее на увеличение объемного содержания данной фазы, которая становится преобладающей после проведения термического отжига при температуре 800 °С. Это объясняется термическим испарением атомов олова, приводящим к восстановлению стехиометрии до диоксида олова.

Размер областей когерентного рассеяния (кристаллитов) в нестехиометрических пленках SnO_2 без учета внутренних микронапряжений оценивался по соотношению Дебая–Шеррера [20, 22]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta},$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; β – полная ширина дифракционной линии на высоте половинной интенсивности (в радианах), θ – угловое положение дифракционного максимума, коэффициент $K = 0,94$.

С помощью приведенного выше соотношения был оценен размер кристаллитов диоксида олова в пленке, который оказался равен 11–15 нм для серии образцов *S1–S6* и 25–35 нм для образца *S7*.

Из полученных данных можно сделать вывод, что после отжига на воздухе формируется поликристаллическая структура, в которой присутствуют фазы как монооксида SnO , так и диоксида олова SnO_2 с размерами кристаллитов ≈ 12 нм. В результате отжига в атмосфере аргона у проводящих пленок присутствует фаза монооксида, размеры кристаллитов которой составляют порядка 12 нм и практически не изменяются при отжиге до температур менее 800 °С, и фазы диоксида олова, с возрастанием температуры отжига до 800 °С размеры кристаллитов увеличиваются до 25–35 нм. Отжиг при температуре 800 °С приводит к разрушению фазы монооксида олова и значительному росту фазы диоксида олова. Полученные результаты подтверждают предположения об изменении структуры и фазового состава пленок, высказанные выше на основе анализа данных импедансной спектроскопии.

Закключение

В работе обосновано использование метода импедансной спектроскопии для исследования

влияния отжига в инертной среде на электропроводность на переменном токе и структурные свойства тонких пленок диоксида олова.

Разработана методика изготовления пленок SnO_2 различного стехиометрического состава, которая заключается в двухступенчатом окислении металлических пленок олова, полученных с помощью магнетронного распыления на постоянном токе, и последующем отжиге в инертной среде в интервале температур 300 – 800 °С.

Использование метода импедансной спектроскопии позволило установить, что в процессе окислительного отжига формируется поликристаллическая пленка диоксида олова, электропроводность которой можно варьировать отжигом в инертной среде, в результате которого происходит перекристаллизация пленок и изменение ее стехиометрического состава, а также увеличение размеров кристаллитов SnO_2 .

Работа выполнена в рамках задания 3.3.1 ГПНИ «Конвергенция-2020» (подпрограмма «Объединение») и гранта Министерства образования Республики Беларусь для студентов, аспирантов и докторантов.

Список использованных источников

1. Barsoukov, E. Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications / E. Barsoukov, J. Ross Macdonald. – Second Edition. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005. – 595 p.
2. Chizhov, A.S. Frequency-dependent electrical conductivity of nanocrystalline SnO_2 / A.S. Chizhov, M.N. Rumyantseva, A.M. Gaskov // Inorganic Materials. – 2013. – Vol. 49, no. 10. – P. 1000–1004.
3. Богданов, К.П. Равновесие собственных точечных дефектов в диоксиде олова / К.П. Богданов, Д.Ц. Димитров, О.Ф. Луцкая, Ю.М. Таиров // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 10. – С. 1158–1160.
4. Громов, В.Ф. Механизмы сенсорного эффекта в кондуктометрических датчиках на основе диоксида олова для детектирования газов-восстановителей / В.Ф. Громов, Г.Н. Герасимов, Т.В. Бельшева, Л.И. Трахтенберг // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 80–87.
5. Кофстад, П. Отклонение от стехиометрии, диффузия и электропроводность в простых оксидах металлов / П. Кофстад; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 396 с.
6. Godinho, K.G. Energetic and Electronic Structure Analysis of Intrinsic Defects in SnO_2 / K.G. Godinho, A. Walsh, G.W. Watson // J. Phys. Chem. C. – 2009. – Vol. 113. – P. 439–448.
7. Bansal, S. Charge transport mechanism in high conductivity undoped tin oxide thin films deposited by reactive sputtering / S. Bansal, D.K. Pandya, S.C. Kashyap // Thin Solid Films. – 2012. – Vol. 524. – P. 30–34.
8. Васильев, Р.Б. Импеданс-спектроскопия ультрадисперсной керамики с варьируемым размером кристаллитов / Р.Б. Васильев [и др.] // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 1. – С. 108–111.
9. Ginley, D. Handbook of Transparent Conductors / D. Ginley, H. Hosono, David C. P. (Eds.) – Associate Editors. – 2011. – 547 p.
10. Batzill, M. The surface and materials science of tin oxide / M. Batzill, U. Diebold // Progress in Surface Science. – 2005. – Vol. 79. – P. 47–154.
11. Zak, A.K. Substrate free synthesis of wide area stannic oxide nano-structured sheets via a sol-gel method using gelatin / A. Khorsand Zak, A. Moradi Golsheikh, W. Haliza Abd Majid, S.M. Banihashemian // Materials Letters. – 2013. – Vol. 109. – P. 309–312.
12. Гаськов, А.М. Химическая модификация нанокристаллического диоксида олова для селективных газовых сенсоров / В.В. Кривецкий, М.Н. Румянцев, А.М. Гаськов // Успехи химии. – 2013. – Т. 82, № 10. – С. 917–941.
13. Ksenevich, V.K. Fabrication and characterization of transparent tin dioxide films with variable stoichiometric composition / V.K. Ksenevich, D.V. Adamchuk, V.B. Odzhaev, P. Zhukowski // Acta Physica Polonica A. – 2015. – Vol. 128. – P. 861–863.
14. Домашевская, Э.П. Механизмы окисления тонких металлических пленок олова / Э.П. Домашевская [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14, № 3. – С. 328–333.
15. Garkin, L.N. Impedance Spectroscopy of Metal-Oxide Nanocomposites / L.N. Garkin [et al.] // Glass Physics and Chemistry. – 2004. – Vol. 30. – P. 461–470.
16. Sluyters-Rehbach, M. Impedances of electrochemical systems: terminology, nomenclature, and representation. Part I: cells with metal electrodes and liquid solutions / M. Sluyters-Rehbach // Pure and Appl. Chem. – 1994. – Vol. 66, no. 9. – P. 1831–1891.
17. Гнеденков, С.В. Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса заряда / С.В. Гнеденков, С.Л. Синебрюхов // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 5. – С. 6–16.
18. Attaran-Kakhki, E. Fabrication and characterization of silver-tin dioxide core-shell structured nanocomposite particles / E. Attaran-Kakhki, M. Khosravi-Nouri, N. Shahtahmassebi, G. Zohuri // Materials Physics and Mechanics. – 2013. – No. 17. – P. 29–32.
19. Agilan, S. Structural and ferromagnetic investigation of the size effects in pure and Co doped SnO_2 nano-particles / S. Agilan, M. Saravanakumar, N. Muthukumarasamy, V. Rukkumani // Int. J. Chem. Sci. – 2015. – Vol. 13, no. 2. – P. 605–612.
20. Borojerdian, P. Structural and Optical Study of SnO Nanoparticles Synthesized Using Microwave-Assisted Hydrothermal Route / P. Borojerdian // Int. J. Nanosci. Nanotechnol. – 2013. – Vol. 9, no. 2. – P. 95–100.

21. Comini, E. Oxidation of Sn thin films to SnO₂. Micro-Raman mapping and X-ray diffraction studies / E. Comini [et al.] // *J. Mater. Res.* – 1998. – Vol. 13, no. 9. – P. 2457–2460.
22. Ristića, M. Dependence of nanocrystalline SnO₂ particle size on synthesis route / M. Ristića, M. Ivanda, S. Popović, S. Musića // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 2002. – Vol. 303, no. 2. – P. 270–280.

Research was carried out within the framework of project 3.3.1 funded by the State Program of Scientific Research «Convergence – 2020» (subprogram «Integration») and the grant of the Ministry of Education of the Republic of Belarus for the students, postgraduate students and doctoral candidates.

References

1. Barsoukov E., Macdonald J. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and applications. Second Edition. John Wiley & Sons, 2005, 595 p.
2. Chizhov A.S., Rumyantseva M.N., Gaskov A.M. Frequency-dependent electrical conductivity of nanocrystalline SnO₂. *Inorganic Materials.* 2013, vol. 49, no. 10, pp. 1000–1004. doi: 10.1134/S0020168513100014
3. Bogdanov K.P., Dimitrov D.Tz., Lutskaia O.F., Tairov Yu.M. Equilibrium of native point defects in tin dioxide. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 10, pp. 1033–1035. doi: 10.1134/1.1187560
4. Gromov V.F., Gerasimov G.N., Belysheva T.V., Trachtenberg L.I. Mechanisms of sensory effect in the conductivity sensor based on tin dioxide for detecting gas-reducing. *Journal of the Russian Chemical Society named D.I. Mendeleev*, 2008, vol. 52, no. 5, pp. 80–87 (in Russian).
5. Kofstad P. Deviation from stoichiometry, diffusion and electrical conductivity in the simple metal oxides: Tr. from English. Moscow, Mir Publ., 1975, 396 p. (in Russian).
6. Godinho K.G., Walsh A., Watson G.W. Energetic and electronic structure analysis of intrinsic defects in SnO₂. *J. Phys. Chem. C.*, 2009, vol. 113: pp. 439–448. doi: 10.1021/jp807753t
7. Bansal S., Pandya D.K., Kashyap S.C. Charge transport mechanism in high conductivity undoped tin oxide thin films deposited by reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 2012, vol. 524, pp. 30–34. doi: 10.1016/j.tsf.2012.09.062
8. Vasiliev R.B., Dorofeev S.G., Rumyantseva M.N., Ryabova L.I., Gas'kov A.M. Impedance spectroscopy of the ultrafine-grain SnO₂ ceramic with variable grain size. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 1, pp. 104–107. doi: 10.1134/S1063782606010180
9. Ginley D., Hosono H., David C.P. Handbook of transparent conductors. 2011, 547 p. doi: 10.1007/978-1-4419-1638-9
10. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*, 2005, vol. 79, pp. 47–154. doi: 10.1016/j.progsurf.2005.09.002
11. Zak K.A., Golsheikh M.A., Haliza Abd Majid W., Banihashemian S.M. Substrate free synthesis of wide area stannic oxide nano-structured sheets via a sol-gel method using gelatin. *Materials Letters*, 2013, vol. 109, pp. 309–312. doi: 10.1016/j.matlet.2013.07.084
12. Krivetsky V.V., Rumyantsev M.N., Gaskov A.M. Chemical modification of nanocrystalline tin dioxide for selective gas sensors. *Russian Chemical Reviews*, 2013, vol. 82, no. 10, pp. 917–941. doi: 10.1070/RC2013v082n10ABEH004366
13. Ksenevich V.K., Adamchuk D.V., Odzhaev V.B., Zhukowski P. Fabrication and characterization of transparent tin dioxide films with variable stoichiometric composition. *Acta Physica Polonica A.*, 2015, vol. 128, pp. 861–863.
14. Ryabtsev S.V., Chuvankova O.A., Popov A.E., Chernyshov F.M., Riabtseva N.S., Domashevskaya E.P. The mechanisms of oxidation of thin metal films of tin. *Condensed Matter and interphase boundaries*, 2012, vol. 14, no. 3, pp. 328–333 (in Russian).
15. Garkin. L.N. Tomaev V.V., Moshnikov V.A., Miroshkin V.P., Zhivago A.Yu. Impedance spectroscopy of metal-oxide nanocomposites. *Glass Physics And Chemistry*, 2004, vol. 30, no. 5, pp. 461–470. doi: 10.1023/B:GPAC.0000045928.95952.ba
16. Sluyters-Rehbach M. Impedances of electrochemical systems: terminology, nomenclature, and representation. part i: cells with metal electrodes and liquid solutions. *Pure and Appl. Chem.*, 1994, vol. 66, no. 9, pp. 1831–1891.
17. Gnedenkov S.V. Sinebryukhov S.L. Impedance spectroscopy in the study of charge transfer. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2006, vol. 5, pp. 6–16. (in Russian).
18. Khosravi-Nouri M, Shahtahmassebi N., Attaran-Kakhki E., Zohuri G. Fabrication and characterization of silver-tin dioxide core-shell structured nanocomposite particles. *Materials Physics and Mechanics*, 2013, vol. 17, pp. 29–32.
19. Saravanakumar M., Agilan S., Muthukumarasamy N., Rukkumani V. Structural and ferromagnetic investigation of the size effects in pure and co doped SnO₂ nano particles. *Int. J. Chem. Sci.*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 605–612.
20. Borojerdian P. Structural and optical study of SnO nanoparticles synthesized using microwave-assisted hydrothermal route *Int. J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 95–100.
21. Comini E., Sangaletti L., Depero L., Allieri B., Pioselli F., Sberveglieri G., Zocchi M. Oxidation of Sn thin films to SnO₂. Micro-Raman mapping and x-ray diffraction studies. *J. Mater. Res.*, 1998, vol. 13, no. 9. doi: 10.1557/JMR.1998.0343
22. Ristića M., Ivanda M., Popović S., Musića S. Dependence of nanocrystalline SnO₂ particle size on synthesis route. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002, vol. 303, no. 2, pp. 270–280. doi: 10.1016/S0022-3093(02)00944-4

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. 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, jpg, стук, разрешение не менее 300 dpi). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т.д. Подписи к рисункам даются на отдельном листе на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе Microsoft Equation Editor, 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: **прямо** набираются греческие и русские буквы (в т.ч. в индексе), математические символы, символы химических элементов; **курсивом** набираются латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе); **жирным шрифтом** – векторы (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in one of graphical formats (tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in Microsoft Equation Editor.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы:
74835; 748352