

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 8

№ 3

Vol. 8

2017

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 8

№ 3

2017

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Макет и верстка: Костина Г.А., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 28.08.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 11,86 Уч.-изд. л. 4,64 Тираж 300 экз.

Дата выхода в свет 11.09.2017. Заказ № 701

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 8

№ 3

2017

Editor-in-chief

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

Deputy editor-in-chief

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

Secretary

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

Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Mikhail G. Kiselev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Manufacture of Devices Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Tomasz N. Koltunowicz**, PhD, Associate Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)
- Fadey F. Komarov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Nikolay V. Kuleshov**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Petr V. Kuchynski**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Alan Kemp**, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)
- Xavier Mateos**, PhD, Associate Professor, Universitat Rovira i Virgili (Tarragona, Spain)
- Vasili V. Mashko**, Doctor of Science (Engineering), Deputy Director of B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)
- Valentin V. Murav'iov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Telecommunication Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)
- Vladimir A. Pilipenko**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis», Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)
- Yuriy M. Pleskachevsky**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, the Adviser of National Academy of Sciences of Belarus, (Minsk, Belarus)
- Alexander D. Pogrebnjak**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)
- Pavel S. Serenkov**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Standardization, Metrology and Information Systems Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Vladimir L. Solomakho**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of the Republican Institute of Innovative Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Arkady S. Turtsevich**, Doctor of Science (Engineering), Chief of Department, the Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)
- Viacheslav V. Khatko**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Tse Li**, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)
- Alexander F. Cherniavsky**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Intelligent Systems Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Sergei A. Chizhik**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)
- Alexey P. Shkadarevich**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO (Minsk, Belarus)
- Konstantin V. Yumashev**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

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

ADDRESS:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г.</i> Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора.....	203
<i>Канюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузов М.Д., Боргеков Д.Б., Кенжина И.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В.</i> Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники.....	214
<i>Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.</i> Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем.....	222

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Якимчук Д.В., Канюков Е.Ю., Демьянов С.Е., Бундюкова В.Д., Дейнак А.В., Макоед И.И., Арзуманян Г.М., Дорошкевич Н.В., Маматкулов К.З., Сиваков В.</i> Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах SiO₂/n-Si-шаблона.....	228
<i>Злобин Д.В., Волкова Л.В.</i> Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков.....	236
<i>Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.</i> Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования.....	246
<i>Козлов В.Л.</i> Учет влияния дестабилизирующих факторов для повышения точности измерений дальномера на основе стереоизображений.....	254
<i>Муравьев В.В., Тапков К.А.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении.....	263
<i>Sutkowski M., Saukova Ya.</i> Research of Digital Camera Dynamic Range on the Imaging Processing Basis.....	271

Метрологическое обеспечение измерений

<i>Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.</i> Метрологическое обеспечение дозиметрии гамма-излучения с энергией до 10 МэВ для приборов радиационной защиты.....	279
<i>Хорлоогийн А.С., Серенков П.С., Романчук В.М.</i> Обеспечение функциональной взаимозаменяемости при формировании контрольного комплекса показателей исходного состояния потребителя физкультурно-оздоровительных услуг.....	286

CONTENTS

Measuring Instruments

- Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G.*
Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor 203
- Kaniukov E.Yu., Shumskaya E.E., Kutuzau M.D., Borgekov D.B., Kenzhina I.E., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V.*
Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements 214
- Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.*
Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications 222

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

- Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Yu., Demyanov S.E., Bundyukova V.D., Dzeinak A.V., Makoed I.I., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V., Mamatkulov K.Z., Sivakov V.*
Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on the Shape of Silver Nanostructures Grown in the SiO₂/n-Si Porous Template 228
- Zlobin D.V., Volkova L.V.*
Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control Rods 236
- Lukashevich R., Fokov G.*
Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units 246
- Kozlov V.L.*
Consideration of the Destabilizing Factors Influence for Increasing of the Measurements Accuracy of a Rangefinder Based on Stereo Images 254
- Muravev V.V., Tapkov K.A.*
Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production 263
- Sutkowski M., Saukova Ya.*
Research of Digital Camera Dynamic Range on the Imaging Processing Basis 271

Metrological Assurance of Measurements

- Komar D., Lukashevich R., Guzov V., Kutsen S.*
Metrological Support of Dosimetry Gamma-Ray with Energy to 10 MeV for Radiation Protection Devices 279
- Khorloohiy A.S., Serenkov P.S., Romanchack V.M.*
The Ensuring Functional Interchangeability when Forming the Control Complex of Indicators of the Initial Condition of the Consumer of Sports and Improving Services 286
-

УДК: 621.039

Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора

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

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

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

Поступила 26.07.2017

Принята к печати 27.08.2017

Последние десятилетия развитие методов прикладных расчетов теплогидравлических процессов, происходящих в ядерном реакторе, ознаменовано бурным ростом вычислительных мощностей суперкомпьютеров (*High Performance Computing, HPC*), способствующих активному внедрению методов вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура *CFD*). Использование таких программ для обоснования технико-экономических показателей, в особенности безопасности ядерных реакторов, требует проведения всесторонней верификации математических моделей и самих *CFD*-программ. Целью работы являлась разработка и адаптация измерительной системы, обладающей характеристиками, необходимыми для ее применения в составе верификационного экспериментального стенда. Стенд предназначен для исследования процессов смешения потоков теплоносителя с различными физическими свойствами (например, концентрацией растворенных примесей) внутри крупномасштабной модели реактора. Основным методом, применяемый для регистрации пространственного поля концентрации в области смешения, – метод пространственной кондуктометрии.

В ходе работы создан измерительный комплекс, включающий пространственные кондуктометрические датчики, систему вторичных преобразователей и программное обеспечение. Разработаны методики калибровки и нормировки результатов измерений. В ходе первой серии экспериментов получены осредненные поля концентрации примеси в потоке теплоносителя, нестационарные реализации измеряемой локальной проводимости, проводился их спектральный и статистический анализ.

Проведено сравнение полученных данных с претестовыми *CFD*-расчетами, выполненными в программе *ANSYS CFX*. Совместный анализ полученных результатов позволил выявить основные закономерности исследуемого процесса, продемонстрировать возможности созданной измерительной системы в части получения экспериментальных данных требуемого для верификации «*CFD*-качества».

Проведенная адаптация пространственных датчиков позволяет провести более обширную программу экспериментальных исследований, на основе которой будет создан банк данных и необходимых обобщений. Полученная информация дает возможность ответить на ряд вопросов, связанных с масштабированием результатов *CFD*-расчетов на натурные параметры работы водо-водяных ядерных реакторов.

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

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г.
Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 203–213.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

For citation:

Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G.
[Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 203–213 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor

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

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

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

Received 26.07.2017

Accepted for publication 27.08.2017

Abstract

The last decades development of applied calculation methods of nuclear reactor thermal and hydraulic processes are marked by the rapid growth of the High Performance Computing (HPC), which contribute to the active introduction of Computational Fluid Dynamics (CFD). The use of such programs to justify technical and economic parameters and especially the safety of nuclear reactors requires comprehensive verification of mathematical models and CFD programs. The aim of the work was the development and adaptation of a measuring system having the characteristics necessary for its application in the verification test (experimental) facility. It's main objective is to study the processes of coolant flow mixing with different physical properties (for example, the concentration of dissolved impurities) inside a large-scale reactor model. The basic method used for registration of the spatial concentration field in the mixing area is the method of spatial conductometry.

In the course of the work, a measurement complex, including spatial conductometric sensors, a system of secondary converters and software, was created. Methods of calibration and normalization of measurement results are developed. Averaged concentration fields, nonstationary realizations of the measured local conductivity were obtained during the first experimental series, spectral and statistical analysis of the realizations were carried out.

The acquired data are compared with pretest CFD-calculations performed in the ANSYS CFX program. A joint analysis of the obtained results made it possible to identify the main regularities of the process under study, and to demonstrate the capabilities of the designed measuring system to receive the experimental data of the «CFD-quality» required for verification.

The carried out adaptation of spatial sensors allows to conduct a more extensive program of experimental tests, on the basis of which a databank and necessary generalizations will be created. The received information allows to answer a number of questions related to scaling up the results of CFD calculations at the full-scale parameters of pressurized nuclear reactors.

Keywords: measuring system, spatial conductometry, nuclear reactor, computational fluid dynamics, turbulent flows.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г.
Разработка и адаптация вихреобразующей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 203–213.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

For citation:

Dmitriev S.M., Khrobostov A.E., Barinov A.A., Glavny V.G.
[Development and Adaptation of Vortex Realizable Measurement System for Benchmark Test with Large Scale Model of Nuclear Reactor].

Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 203–213 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-203-213

Введение

Последние десятилетия развитие методов прикладных расчетов теплогидравлических процессов, происходящих в ядерном реакторе, ознаменовано бурным ростом вычислительных мощностей суперкомпьютеров (*High Performance Computing, HPC*), способствующих активному внедрению методов вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура *CFD*). Использование таких программ для обоснования технико-экономических показателей, а в особенности безопасности ядерных реакторов, требует проведения всесторонней верификации математических моделей и самих *CFD*-программ. Верификационная база для *CFD*-программ основывается на эталонных экспериментах (бенчмарках), дающих возможность получить высококачественные эмпирические данные о протекании моделируемых теплогидравлических процессов [1]. Пригодные для верификации данные должны обладать специфическим «*CFD*-качеством»: высоким пространственно-временным разрешением реализаций измеряемых величин, повышенной точностью измерений, а также учитывать характерные особенности исследуемого класса течений. Такие особенности проведения бенчмарков требуют развития методического обеспечения эксперимента, средств измерений, а также обработки и обобщения экспериментальных данных.

Актуальным вопросом применения *CFD*-программ для обоснования режимов работы ЯЭУ является вопрос масштабирования результатов верификации, выполненной на эталонных экспериментах. Под масштабированием в широком смысле понимается демонстрация методов и границ переносимости результатов *CFD*-расчетов модельных процессов (отличающихся геометрическим масштабом и/или значениями параметров) на натурные условия работы ЯЭУ [1]. Международную практику проведения крупномасштабных верификационных экспериментов составляет ряд исследований прикладного характера (экспериментальные установки *ROCOM*, *Fortum PTS*, *Vattenfall*, *KAERI*, ОКБ ГП и *IRIS*, выполненные в масштабе от 1:5 и до 1:2,56 соответственно [2–7]). Следует отметить, что несмотря на разнообразие целей, методов и

особенностей проведенных экспериментов, планомерное решение задачи масштабирования *CFD*-расчетов не являлось прямой целью ни одной из указанных работ. В ходе перечисленных исследований оказалась не в полной мере раскрыта степень отдельного влияния основных параметров, определяющих процесс течения (вязкости, скорости и гидравлического диаметра потока), на процессы смешения, недостаточно внимания уделено исследованию статистических и спектральных характеристик потока в крупномасштабной области смешения. Задачи верификации расчетов процессов смешения требуют получения динамических полей в широком диапазоне степени смешения исследуемых потоков – от полностью несмешанных до практически гомогенного распределения измеряемых характеристик. Данные аспекты в значительной части также остались за рамками проведенных работ.

Одним из методов измерения локальных характеристик потока, который может применяться для исследований с учетом вышеуказанных особенностей задачи, является метод пространственной кондуктометрии, применявшийся в т.ч. в некоторых из вышеприведенных исследований.

Задачами настоящего этапа исследований являлись разработка и адаптация кондуктометрической измерительной системы, а также апробация ее применения в составе крупномасштабного верификационного стенда с учетом актуальных вопросов моделирования, не раскрытых в ходе предыдущих работ другими коллективами.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальный стенд выполнен по схеме (рисунок 1), позволяющей организовать замкнутые и разомкнутые режимы пролива экспериментальных моделей (ЭМ) ядерных реакторов различной конструкции и размеров. Оборудование стенда позволяет создать различные режимы смешения теплоносителя внутри модели реактора в широком диапазоне температур, расходов и концентраций примеси в потоке теплоносителя. Основные параметры стенда следующие: давление до 2 МПа, температура – до 180 °С, расходы через ЭМ – до 200 м³/час, суммарная мощность потребителей стенда – 1 МВт эл., внешний диаметр ЭМ – до 1,5 м.

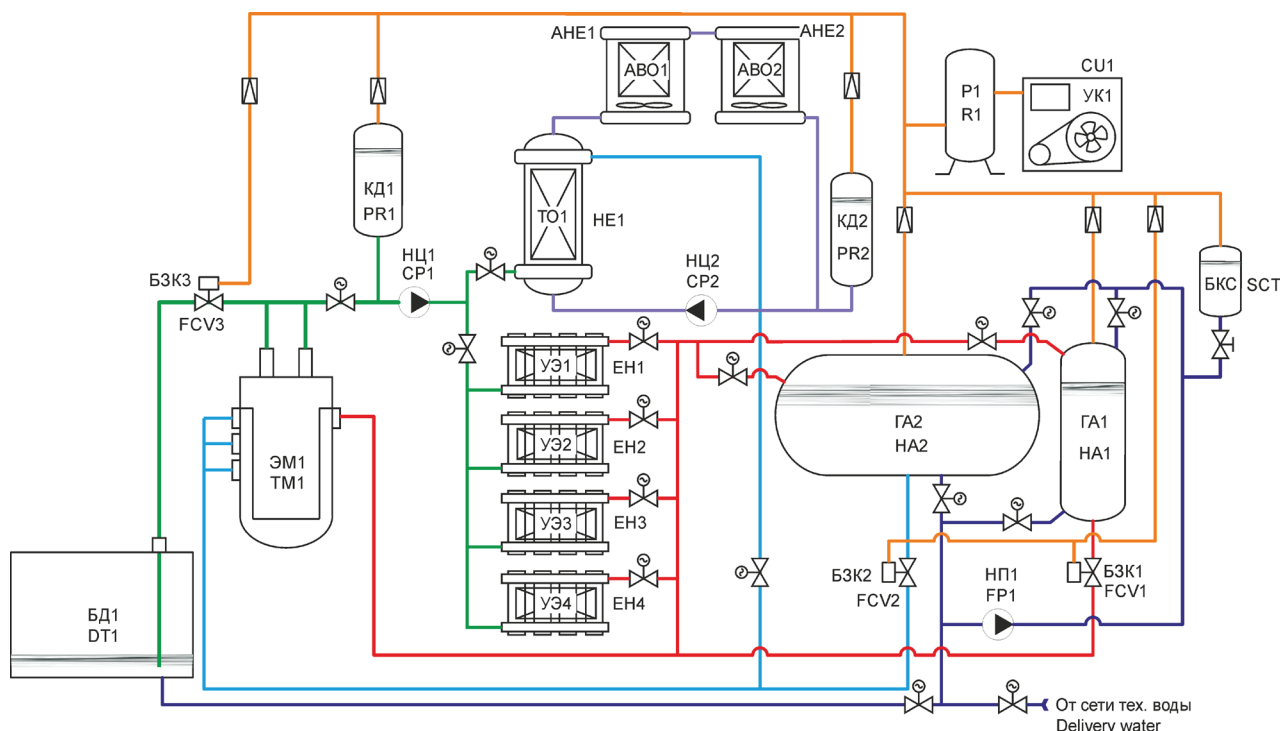


Рисунок 1 – Упрощенная схема экспериментального стенда: ЭМ1 – экспериментальная модель; УЭ1-4 – электронагревательные установки; ТО1 – теплообменник 1–2 контуров; АВО1-2 – аппараты воздушного охлаждения; КД1-2 – компенсаторы давления контуров; НЦ1-2 – циркуляционные насосы контуров; НП1 – подпиточный насос 1-го контура; ГА1-2 – гидроаккумуляторы теплоносителя (3 и 10 м³); БКС – бак запаса концентрата соли; БД1 – дренажный бак (15 м³); БЗК1-3 – быстрозапорные пневмоклапаны; УК1 – компрессорная установка; P1 – ресивер

Figure 1 – Simplified circuit of the test facility: TM1 – reactor test model; EH1-4 – electrical heating units; HE1 – heat exchanger of primary and secondary circuits; ANE1-2 – air cooled heat exchangers; PR1-2 – pressurizers of the circuits; CP1-2 – circulation pumps of the circuits; FP1 – feed pump of the primary circuit; HA1-2 – hydraulic accumulators; SCT – salt concentrate tank; DT1 – drainage tank (15 m³); FCV1-3 – fast check valves; CU1 – compressor unit; R1 – air receiver

Для проведения исследования смешения потоков в изотермической постановке стенд работает по следующему алгоритму. При подготовке режима теплоноситель разогревается до необходимой температуры эксперимента. Для этого с напора насоса НЦ1 теплоноситель поступает на раздающий коллектор нагревателей УЭ1-4, проходя которые он нагревается и раздается на гидроаккумуляторы ГА1-2. Из них по линиям подачи потоки теплоносителя подаются в модель ЭМ1, где смешиваются и вновь поступают на насос НЦ1. Циркуляция указанным способом происходит до полного прогрева теплоносителя, трубопроводов и оборудования стенда до заданной температуры. В первом контуре стенда создается необходимое избыточное давление, поддерживаемое работой компрессора УК1 в составе системы воздуха высокого давления. При достижении изотермических условий в первом контуре емкость ГА1 отключается от циркуляции на НЦ1, включается подпиточный насос НП1,

запускающий циркуляцию через ГА1 по замкнутому контуру водоподготовки. При помощи ручного клапана на трубопроводе подачи концентрата соли из бака запаса БКС производится дозирование концентрата в контур водоподготовки. Спустя некоторое время емкость ГА1 полностью заполняется равновесной избыточной концентрацией соли, после чего НП1 и НЦ1 выключаются и клапаны трубопроводов переключаются для выхода на старт экспериментального режима. Перед началом пролива БЗК1-2 открыты, БЗК3 закрыт, в ГА1-2 создано избыточное давление воздуха. Теплоноситель в ГА1 и ГА2 находится при одинаковой температуре (равной температуре в первом контуре и ЭМ1) и с различным содержанием соли. Для начала пролива БЗК3 открывается и теплоноситель под действием газовых подушек в ГА1-2 направляется в ЭМ1, где происходит исследуемое смешение, а затем сливается в дренажный бак БД1. Постоянство избыточного давления в ГА1,2 поддерживается работой редук-

торов, установленных на соответствующих пневмолиниях. По окончании пролива (после опорожнения до допустимого уровня ГА1-2) БК31-3 закрываются, а теплоноситель, слитый в БД1, может быть снова направлен на заполнение ГА1-2 при помощи НП1 или сдrenирован. Для достижения необходимой температуры в дальнейшем теплоноситель может как подогреваться в УЭ1-4, так и охлаждаться в ТО1 за счет теплообмена с теплоносителем второго контура. Конечным приемником тепла при этом является атмосферный воздух, охлаждающий трубки АВО1-2.

Объектом исследований является экспериментальная модель, обобщенно имитирующая характерные для водо-водяных установок элементы геометрии реактора: коллекторную впускную камеру с радиальным подводом теплоносителя, опускную кольцевую камеру, нижнюю камеру эллиптического днища, подъемные каналы-имитаторы активной зоны, верхнюю сливную камеру (рисунок 2).

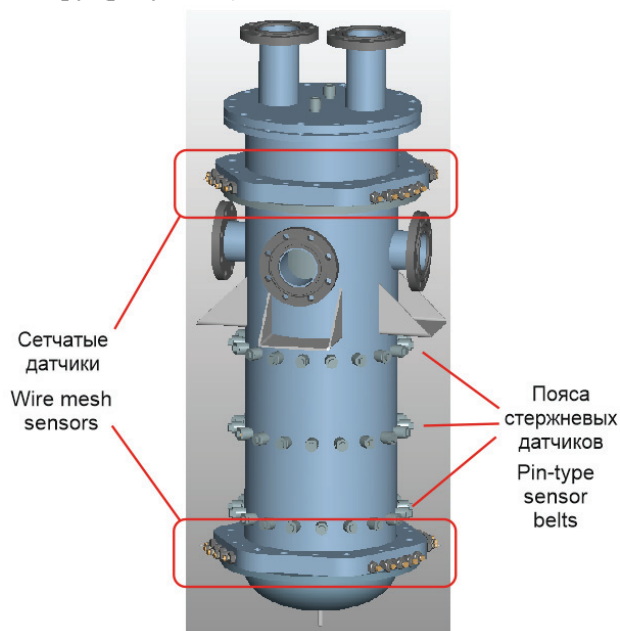


Рисунок 2 – Внешний вид экспериментальной модели с установленными датчиками проводимости
Figure 2 – Test model with installed spatial conductometers general view

ЭМ оснащена четырьмя патрубками ввода теплоносителя, по одному из которых подается вода с избыточным содержанием соли («соленый» поток из ГА1), по трем другим – вода с пониженным содержанием соли («пресные» потоки из ГА2). Организуемый «несимметричный» режим схематично представлен на рисунке 3. Эксперименты проводились в предположении гидродинамической «пассивности» регистри-

руемой примеси – т.е. при отсутствии влияния растворенной примеси на плотность и вязкость среды в потоке. Это достигалось за счет применения истинно растворимой (диссоциирующей) соли Na_2SO_4 , а также выбором малой разности концентрации примеси в смешиваемых потоках. Таким образом, в изотермической постановке эксперимента исключались силы плавучести, т.к. их влияние на смешение не является предметом исследований в рамках данной работы. Теплоноситель проходит от входных патрубков ЭМ вниз по опускной кольцевой камере, попадает в нижнюю напорную камеру, откуда распределяется по каналам-имитаторам активной зоны с установленными входными дросселями. По окончании подъема в каналах имитаторов теплоноситель выходит в верхнюю сливную камеру и удаляется из модели через два выходных патрубка в ее крышке. Масштаб модели по наружному диаметру опускной кольцевой камеры (по отношению к реактору ВВЭР-1000) составляет 10,8.

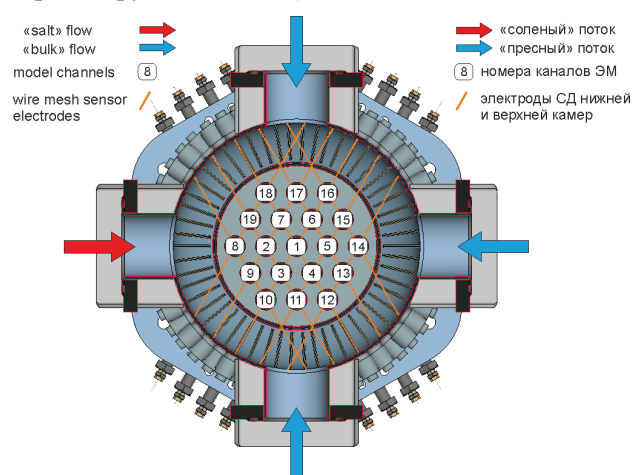


Рисунок 3 – Моделируемый «несимметричный» режим работы реактора
Figure 3 – «Non-symmetrical» mode of the reactor to be modelled

Описание разработанной измерительной системы

Адаптация метода пространственной кондуктометрии для проведения теплогидравлических исследований [8] дает возможность получения высококачественных данных о распределении концентрации соли по объему ЭМ. Для этого в ЭМ установлены специальные датчики-кондуктометры стержневого (в опускной кольцевой камере) и сетчатого (в нижней и верхней камерах) типа (рисунки 2–4).



Рисунок 4 – Сетчатый и стержневой типы пространственных кондуктометрических датчиков

Figure 4 – Wire-mesh and pin-type conductometric sensors

Для организации высокоскоростной регистрации нестационарного поля проводимости, которое может быть пересчитано в концентрацию соли, использовалась система ЛАД-36 разработки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Характеристики разработанной системы приведены в таблице 1. Нормировка полученных значений концентрации (для исключения влияния общих систематических погрешностей и обеспечения сравнимости результатов проливов) производилась в виде:

$$\varphi = \frac{c_{meas} - c_{min}}{c_{max} - c_{min}},$$

где φ – безразмерный скаляр, характеризующий измеренную концентрацию; c_{min} – концентрация пресного потока (концентрация соли в ГА2); c_{max} – концентрация соленого потока (концентрация соли в ГА1), c_{meas} – концентрация соли, измеряемая технологическим кондуктометром или ячейкой пространственного датчика в данный момент времени (мгновенная локальная концентрация).

В отличие от зарубежных аналогов [9], в разработанной системе применен принцип частотного разделения, позволяющий получать физически одновременные данные со всех точек сетчатого датчика, т.е. получать строго «моментальный» снимок мгновенного распределения проводимости в измерительной области датчика.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики измерительной системы
Measurement system capabilities

Характеристика системы System Parameter	Значение Value
Скорость опроса, измерений/ с Acquisition frequency, measurements/ s	10 000
Количество одновременно задействованных входов/выходов измерительного сигнала Number of inputs/outputs of the signal under simultaneous operation	36 (в любой конфигурации / in any configuration)
Предел верхнего измеряемого значения проводимости (мкСм/см) на датчике с геометрической константой $0,6 \text{ см}^{-1}$ Maximum value of measured conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) of the sensor with geometry constant $0,6 \text{ cm}^{-1}$	10 000
Длина соединительных проводов от датчика до системы, м Length of signal wires from the system to the test model, m	до 12 up to 12
Длительность непрерывной регистрации процесса на максимальной частоте при опросе всех каналов Unbreakable duration of the measurement with maximal frequency	Ограничивается емкостью накопителя информации, на который производится запись (60 с – 9 Гб) Limited by free memory of the hard disk only (60 s – 9 Gb)

Результаты экспериментальных и расчетных исследований

В ходе первой серии экспериментов проведено пять проливов экспериментальной модели для трех режимов, параметры которых сведены в таблицу 2.

Таблица 2 / Table 2

Проведенные экспериментальные режимы

Tests carried out

№ п/п	1	2	3
Наименование режима* Mode designation	10/20	20/20	20/56
Общая подача в модель**, м³/ч Common supply through the model, m³/hr	18,9 (19,0)	37,8 (37,7)	18,9 (19,1)
Температура теплоносителя в ГА1,2, °С Coolant temperature in HA1, 2, °C	20 (22)	20 (20)	56 (61)
Давление в ГА1, 2, МПа (изб.) Manometer pressure in HA1, 2, MPa	2,5 (2,3)	2,5 (2,2)	2,5 (2,1)
Солесодержание в ГА1 (ГА2), мг/л Salinity in HA1, mg/l	444 (798)	599 (1286)	433 (752)
Количество вводов стенда в работу Number of tests of the same mode	3***	1	1

Примечания / Comments

*для всех режимов число до дроби – значение Re в опускной камере в тысячах единиц, число после дроби – температура эксперимента, °С

for all modes the number before the fraction is the value of Re in the downcomer in thousands of units, the number after the fraction is the experiment temperature, °C

**указаны номинальные и фактические (в скобках) значения параметров

shows the nominal and actual values (in parentheses) of the parameters

***включая режимы с изменением ориентации подачи потоков

including modes with a change in flow orientation supply

Для регистрации реализации поля концентрации примеси в потоке в ходе каждого пролива выбирались отрезки времени со стабильными значениями параметров режима.

Дополнительные проливы для экспериментального режима 10/20 проводились при смене патрубков подачи соленого и пресных потоков с целью выяснения влияния ориентации подачи на динамику поля концентрации. В первом дополнительном эксперименте соленый поток подавался на канал 17 (верхний патрубок на рисунке 3), во втором – на канал 14 (правый патрубок на том же рисунке).

Постановка эксперимента повторялась в CFD-расчетах с использованием программы *ANSYS CFX*. В качестве контрастной примеси в расчете использовалась температура потока, при этом для исключения влияния плавучести свойства среды задавались независимыми от температуры.

В качестве характеристик исследуемого процесса смешения при сравнительном анализе принимались:

– средние значения концентрации в измерительных ячейках датчиков,

– максимальное и минимальное значения среди них,

– разность максимального и минимального значений (характеризующая интегральную неравномерность поля),

– максимальное мгновенное зарегистрированное значение солёности,

– дисперсии реализаций измерительных сигналов.

Точечная картина, получаемая при помощи сетчатого датчика на входе в имитатор активной зоны, интерполировалась по измерительной области (рисунок 5), создавалась анимация для наглядного отображения динамики поведения нестационарного поля. Дополнительно с целью демонстрации возможностей применяемого метода измерений строились кросс-корреляционные зависимости между сигналами соответствующих ячеек верхнего и нижнего датчиков (рисунок 6), а также спектральные плотности энергии реализаций сигнала для нижнего сетчатого датчика (рисунок 7). По данным, полученным со стержневых датчиков, строились азимутальные графики распределения концентрации в опускной кольцевой камере (рисунок 8).

Вышеуказанные численные характеристики процесса смешения для исследуемых режимов сведены в таблицу 3. Результаты выполненных на данном этапе экспериментальных и расчетных исследований дают возможность сделать следующие обобщающие выводы:

1) Адаптированный метод пространственной кондуктометрии позволяет провести измерения нестационарного пространственного поля концентрации соли при различных температурах среды и режимах течения теплоносителя в экспериментальной модели. Значение восстанавливаемых частот измерительного сигнала (до 4 кГц) перекрывает диапазон частот исследуемых процессов смешения и позволяет построить спектральные характеристики реализаций. Пространственное разрешение получаемых данных достаточно для построения интерполяционных картограмм распределения концентрации.

2) Продолжительная непрерывная регистрация процесса позволяет построить анимационные и осредненные поля концентрации в области смешения. Анализ полученных распределений говорит о наличии закрутки потока внутри ЭМ на угол около 180°. Расчетное значение угла за-

крутки – более 180° , причем направление закрутки потока, полученное в расчете (против часовой стрелки при взгляде сверху), противоположно установленному экспериментально. Результаты

дополнительных проливов для режима 10/10 (с различной ориентацией подачи соленого потока) говорят о качественно одинаковом характере процесса смешения (см. картограммы рисунка 5).

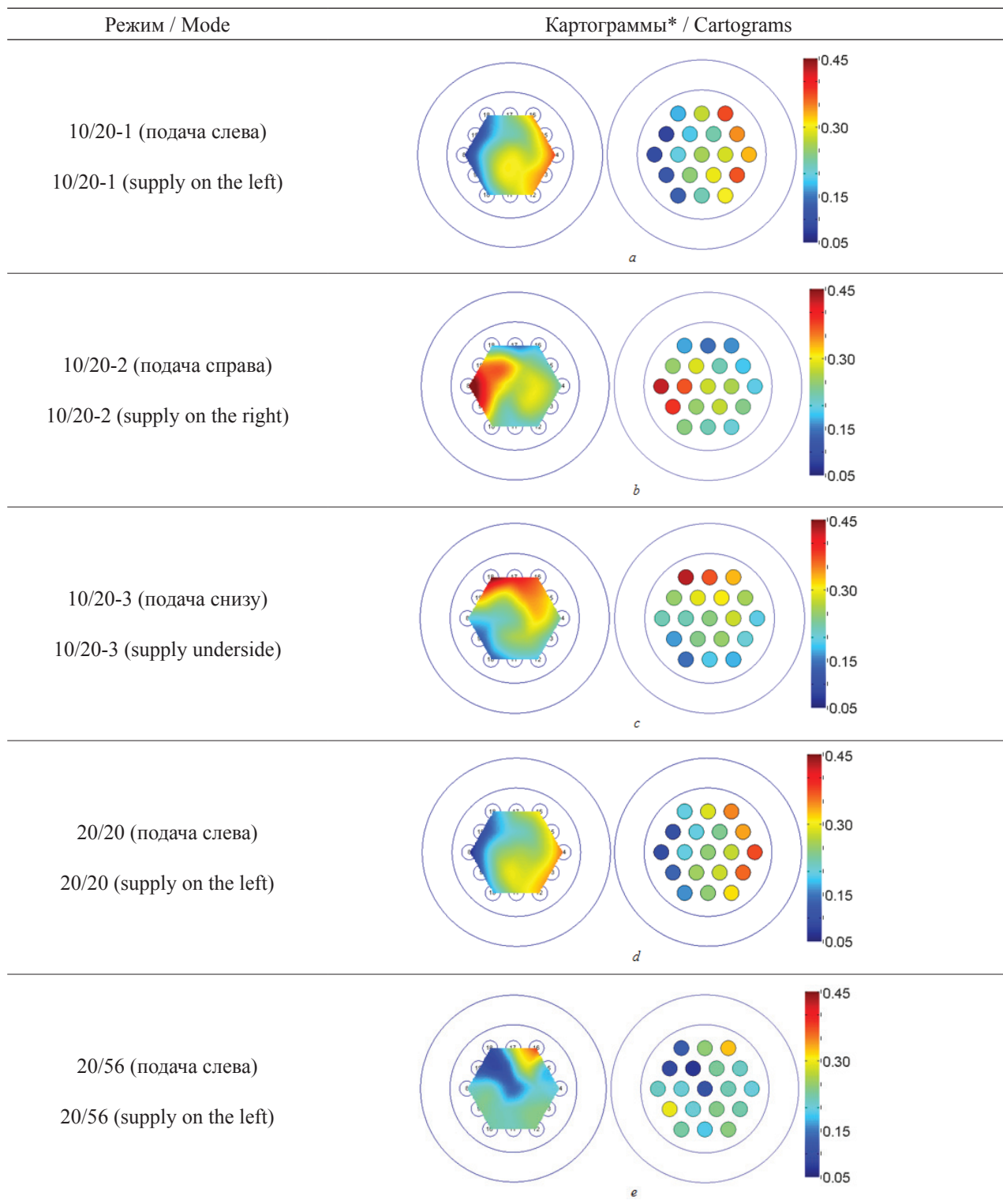


Рисунок 5 – Картограммы экспериментальных распределений концентрации примеси

* Цветовая шкала соответствует относительным значениям измеренной локальной концентрации

Figure 5 – Cartograms of experimental distributions of concentration of impurities

* Colorbar corresponds to the normalized value of measured concentration

Таблица 3 / Table 3

Сравнение характерных параметров процесса в эксперименте и расчете (эксперимент / расчет [отклонение])

Comparison of characteristic parameters of the process in the experiment and calculation (experiment / calculation [deviation])

Режим / Mode	10/20	20/20	20/56
Макс. значение усредненной концентрации (%) и соотв. канал The max. value of the average concentration (%) and the appropriate channel	37,0(16)/ 45,2(16) [8,2]	37,2(14)/ 44,4(16) [7,2]	32,3(16)/ 42,6(16) [10,3]
Мин. значение усредненной концентрации (%) и соотв. канал ЭМ The min. value of the average concentration (%) and the appropriate channel of the EM	7,9(19)/ 9,3(10) [1,4]	9,2(8)/ 10,3(10) [1,1]	6,9(7)/ 11,8(10) [4,9]
Неравномерность интегральная, % Integral unevenness, %	29,1/ 35,9 [6,8]	28,0/ 34,1 [6,1]	25,4/ 30,8 [5,4]
Макс. мгновенное значение концентрации (%) и соотв. канал ЭМ The max. instantaneous concentration (%) and the appropriate channel of the EM	53,6(16)/ 64,1(16) [10,5]	53,2(16)/ 65,2(15) [12,0]	54,9(16)/ 65,9(16) [11,0]
Среднеквадратическое отклонение реализации безразмерной концентрации по каналам с макс. (мин.) осредненным значением, % Root-mean-square deviation of realization of dimensionless concentration in channels with the max. (min.) averaged value, %	8,5(2,9)/ 7,9(5,7) [–0,6 (2,8)]	6,6(3,4)/ 8,0(5,6) [1,4 (2,2)]	8,8(7,1)/ 8,5(6,6) [–0,3 (–0,5)]
Среднее время транспорта по корреляции показаний СД верх-низ измер. (расч.), сек The average transport time for the correlation of the readings of the wire-mesh sensors in the top-bottom measurement. (calculated), s	1,74 (1,63) [–0,11]	0,88 (0,82) [–0,6]	1,59 (1,62) [0,3]

3) На основе вышесказанного прямое сравнение (наложение) осредненных полей для расчета и эксперимента не представляется возможным. Поэтому в качестве критериев для сравнения были выбраны значения максимальной, минимальной мгновенной и осредненной концентрации, а также значения разброса, оцененные по

среднеквадратичному отклонению (σ) реализации. Согласно данным, приведенным в таблице 3, максимальные (минимальные) осредненные значения отличаются не более чем на 10,3 % (4,9 %), при этом для всех режимов расчет превышает оба значения. Средний уровень интегральной неравномерности находится в пределах 25–36 %, при этом расчетные значения неравномерности также больше экспериментальных. Значения σ , оцененные по реализациям, хорошо согласуются с расчетом (отклонения в пределах 3 %).

4) Совместный корреляционный анализ сигналов верхнего и нижнего сетчатого датчиков позволил оценить время транспорта теплоносителя между плоскостями их размещения. Оценочный гидравлический расчет течения в каналах ЭМ для режима 20/20 дает значение времени 0,84 с, в то время как средняя абсцисса максимума функции корреляции равна 0,88 с. Это свидетельствует о возможностях метода пространственной кондуктометрии в части определения скорости потока, что может использоваться в дальнейшем для частичного восстановления поля скорости в потоке.

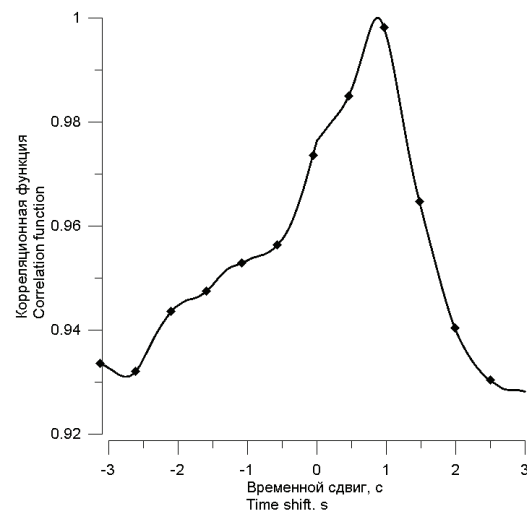


Рисунок 6 – Пример кросскорреляционной зависимости реализаций нижнего и верхнего СД (14-й канал, режим 20/20)

Figure 6 – An example of the cross-correlation dependence of the realizations of the lower and upper wire-mesh sensors (channel 14, mode 20/20)

5) Спектральный анализ сигналов датчиков позволяет оценить диапазон частот основных энергонесущих вихрей и интенсивность каскадного процесса распада вихревых структур. Согласно рисунку 7 характерные частоты крупных вихрей находятся в диапазоне 0–1 Гц. Поскольку все режимы течения являются развитыми турбулентными, к ним может быть применена оценка постоянного значения числа Струхала: $Sh \approx 0,2$. В этом

случае, используя в качестве характерного размера ширину кольцевой камеры модели (0,0635 м), можно оценить характерные частоты основных вихрей: 0,26, 0,52, и 0,25 Гц соответственно, что дает хорошее согласие по порядку величины с экспериментом. Нанесенные на графики наклоны, соответствующие эмпирическому «закону Колмогорова $-5/3$ », позволяют выделить область наибольшего соответствия наклона графика спектральной плотности мощности: 20–120 Гц. При этом расчетный спектр плотности мощности показывает поведение близкое с экспериментальным спектром в области низких частот (около характерных), в то время как далее расчетная кривая спадает гораздо интенсивнее. График расчетной спектральной плотности мощности выходит на плато уже в районе десятков герц, что, возможно, обусловлено фильтрацией нестационарного решения на расчетной сетке. В целом можно заключить, что спектральный анализ реализаций расчета и эксперимента требует более внимательного анализа, рассмотрения более длительных реализаций сигнала и дополнительных тестов на потоках с одинаковой солёностью при различных скоростях течения.

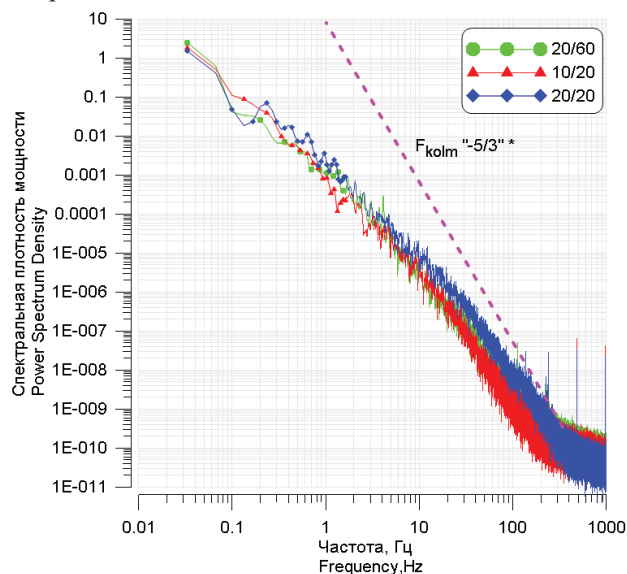


Рисунок 7 – Пример графиков спектральной плотности мощности реализации измерительного сигнала (16-й канал, все режимы)

* F_{kolm} « $-5/3$ » – характерный наклон каскадного процесса передачи энергии при распаде турбулентных вихрей («закон Колмогорова»)

Figure 7 – An example of the power spectral density graph of the measuring signal realization (channel 16, all modes)

* F_{kolm} « $-5/3$ » – characteristic slope of the cascade energy transition due to the turbulent vortex decay («Kolmogorov's law»)

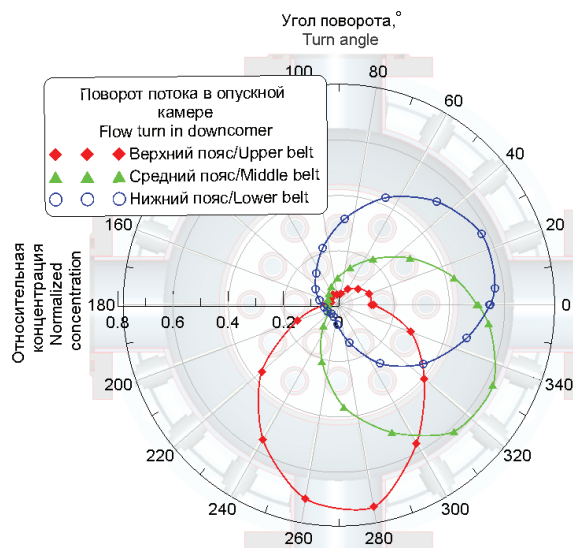


Рисунок 8 – Пример азимутального графика распределения концентрации в кольцевой камере экспериментальной модели

Figure 8 – An example of the azimuthal distribution schedule of the concentration in the annular chamber of the experimental model

Заключение

Проведенный совместный анализ полученных результатов позволил выявить основные закономерности исследуемого процесса, продемонстрировать возможности созданной измерительной системы в части получения экспериментальных данных требуемого для верификации «CFD-качества».

Проведенная адаптация пространственных датчиков позволяет провести более обширную программу экспериментальных исследований, на основе которой будет создан банк данных и необходимых обобщений. Полученная информация дает возможность ответить на ряд вопросов, связанных с масштабированием результатов CFD-расчетов на натурные параметры работы водо-водяных ядерных реакторов.

Список использованных источников

1. Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics // OECD, NEA. – 2016. – 132 с.
2. Rohde, U. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base / U. Rohde [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – Vol. 235. – 2005.
3. Farkas, I. Validation of computational fluid dynamics calculation using Rossendorf coolant mixing

model flow measurements in primary loop of coolant in a pressurized water reactor model / I. Farkas, E. Hutly, T. Farkas, A. Takaxs, A. Guba, I. Toth // *Nuclear engineering and technology*. – 2016. – Vol. 48. – P. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017

4. Kim, K. Mixing behaviors in a downcomer and core inlet / K. Kim, D.J. Euh, T.S. Kwon, E. Schleicher // *Proceedings of Specialists Workshop on Advanced instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (SWINTH-2016)*. – 2016. – paper #016, pp. 1–14.

5. Kim, K. Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions / K. Kim, D.J. Euh, I.C. Chu, Y.J. Youn, H.S. Choi, T.S. Kwon // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – Vol. 265. – P. 957–966. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.07.021

6. Forgone, N. Downcomer and lower plenum experimental facility / N. Forgone, V. Baudanza, I. Angelo, D. Martelli // *Report RdS, ENEA, UNIPI*. – 2011.

7. Волков, В.Ю. Верификация CFD модели реактора по результатам испытания системы быстрого ввода бора / В.Ю. Волков [и др.] // *Материалы 10-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»*. – Подольск, 2017.

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

9. daSilva, M.J. High speed multichannel impedance measuring system / M.J. daSilva, N.S. Eduardo, T.P. Vendruscolo // *Acta IMEKO*. – 2012. – Vol. 1. – P. 36–41.

10. Будников, А.В. Проблемы масштабирования CFD программ к описанию процессов смешения в реакторных установках / А.В. Будников [и др.] // *Сборник трудов НТС «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике»*. – Н. Новгород, 2016.

References

1. Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. *OECD, NEA*, 2016, 132 c.

2. Rohde U., Kliem S., Hohne T., Karlsson R., Hemstrom B., Lillington J., Topipila T., Elter J., Bezrukov Y. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, vol. 235, pp. 421–443.

doi: 10.1016/j.nucengdes.2004.08.045

3. Farkas I., Hutly E., Farkas T., Takaxs A., Guba A., Toth I. Validation of computational fluid dynamics calculation using Rossendorf coolant mixing model flow measurements in primary loop of coolant in a pressurized water reactor model. *Nuclear engineering and technology*, 2016, vol.48, pp. 941–951. doi: 10.1016/j.net.2016.02.017

4. Kim K., Euh D.J., Kwon T.S. Schleicher E. Mixing behaviors in a downcomer and core inlet. *Proceedings of Specialists Workshop on Advanced instrumentation and Measurement Techniques for Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (SWINTH-2016)*, 2016, paper #016, pp. 1–14.

5. Kim K., Euh D.J., Chu I.C., Youn Y.J., Choi H.S., Kwon T.S. Experimental study of the APR+ reactor core flow and pressure distributions under 4-pump running conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 265, pp. 957–966. doi: 10.1016/j.nucengdes.2013.07.021

6. Forgone N., Baudanza V., Angelo I., Martelli D. Downcomer and lower plenum experimental facility. *Report RdS, ENEA, UNIPI*, 2011.

7. Volkov V. Golibrodo L., Krutikov A. Kudryavtsev O., Nadinsky U., Skibin A. [Verification of CFD reactor model on the fast borated water injection system test results]. *Материалы 10-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС»* [Proceedings of the 10th international conference «NPP with VVER safety assurance» JSC OKB Hidropress], 2017 (in Russian).

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

9. daSilva M.J., Eduardo N.S., Vendruscolo T.P. High speed multichannel impedance measuring system. *Acta IMEKO*, 2012, vol. 1, pp. 36–41.

10. Budnikov A.V., Sveshnikov D.N., Romanov R.I. [Problems of CFD-program scaling for mixing processes description in nuclear power units]. *Материалы конференции «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике»* [Problems of CFD-codes verification and application in atomic energy], 2016 (in Russian).

УДК 53.043

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники

Канюков Е.Ю.¹, Шумская Е.Е.¹, Кутузов М.Д.¹, Боргеков Д.Б.^{2,3}, Кенжина И.Е.^{2,3},
Козловский А.Л.^{2,3}, Здоровец М.В.^{2,3}

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,

ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

²Филиал Института ядерной физики, Алматы, Казахстан,

пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,

пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

Поступила 18.07.2017

Принята к печати 22.08.2017

В работе рассмотрены особенности шаблонного синтеза нанотрубок из ферромагнитных металлов (Fe, Co, Ni) в порах трековых мембран. Целью работы являлось изучение их основных структурных и магнитных параметров и демонстрация потенциала применения в элементах гибкой электроники.

При помощи электрохимического осаждения в порах полиэтилентерефталатовых трековых мембран сформированы ферромагнитные нанотрубки с диаметром 110 нм и аспектным соотношением 100. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены морфологические особенности полученных наноструктур, методом энергодисперсионного анализа изучен элементный состав. С использованием рентгеноструктурного анализа установлены основные параметры кристаллической структуры: тип кристаллической решетки, параметр элементарной ячейки и средний размер кристаллитов. Методом вибрационной магнитометрии изучены магнитные свойства.

Показано, что вне зависимости от типа ферромагнитного металла при выбранных условиях синтеза нанотрубки имеют одинаковые характеристические размеры – длину, диаметр и толщину стенки. Полученные нанотрубки состоят соответственно из железа, из кобальта и из никеля и не содержат оксидных примесей. Нанотрубки имеют поликристаллическую структуру стенок с объемно-центрированной кубической (железные), грани-центрированной кубической (кобальтовые и никелевые) кристаллической решеткой. По основным магнитным параметрам нанотрубки соответствуют группе магнитомягких материалов. Также установлено наличие магнитной анизотропии, которая обусловлена особенностями кристаллической структуры и формой наноструктур.

На основании анализа особенностей структурных и магнитных характеристик ферромагнитных нанотрубок, синтезированных в порах трековых мембран, предложены базовые принципы их использования при конструировании элементов гибкой электроники: наноконденсаторов, датчиков направления магнитного поля и магнитных элементов памяти.

Ключевые слова: ферромагнитные нанотрубки, шаблонный синтез, структура и магнитные свойства, гибкая электроника.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Адрес для переписки:

Канюков Е.Ю.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,

ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

e-mail: Ka.egor@mail.ru

Address for correspondence:

Kaniukov E.Yu.

Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,

P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

e-mail: Ka.egor@mail.ru

Для цитирования:

Канюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузов М.Д., Боргеков Д.Б., Кенжина И.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В.

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 214–221.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

For citation:

Kaniukov E.Yu., Shumskaya E.E., Kutuzau M.D., Borgekov D.B., Kenzhina I.E., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V.

[Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 214–221 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements

Kaniukov E.Yu.¹, Shumskaya E.E.¹, Kutuzau M.D.¹, Borgekov D.B.^{2,3}, Kenzhina I.E.^{2,3}, Kozlovskiy A.L.^{2,3}, Zdorovets M.V.^{2,3}

¹Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,
Abaylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

³L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Abaylay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

Received 18.07.2017

Accepted for publication 22.08.2017

Abstract

In the paper the template synthesis of ferromagnetic (Fe, Co, Ni) nanotubes in the pores of track membranes were studied. The aim of this work was determination of nanotubes basic structural and magnetic parameters and demonstration of the possibility of application in the flexible electronics elements.

By electrochemical deposition, ferromagnetic nanotubes with a diameter of 110 nm and an aspect ratio of 100 were formed in the pores of polyethylene terephthalate track membranes. The morphology of the obtained nanostructures were studied by scanning electron microscopy, the elemental composition was determined by the energy-dispersion analysis. Using the X-ray structural analysis, the main parameters of the crystal structure were established: lattice type, lattice parameter and average crystallite size. The magnetic properties were studied by the method of vibrational magnetometry.

It was shown that in the selected conditions of synthesis without reference to the type of ferromagnetic metals nanotubes had the same dimensions – length, diameter and wall thickness. The produced nanotubes consisted of iron, cobalt and nickel, respectively without oxides impurities. Nanotubes had a polycrystalline structure of walls with a body-centered cubic (iron), face-centered cubic (cobalt and nickel) crystal lattice. According to the main magnetic parameters, nanotubes belonged to a group of soft magnetic materials. Also, the presence of magnetic anisotropy, which is caused by the features of crystalline structure and shape of the nanostructures.

Based on the analysis of structural and magnetic characteristics of ferromagnetic nanotubes which were synthesized in the pores of track membranes, were proposed the main principles of their using in the elements' of flexible electronics constructing (magnetic field direction sensors and magnetic memory elements).

Keywords: ferromagnetic nanotubes; template synthesis; structure and magnetic properties, flexible electronics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Адрес для переписки:

Каниюков Е.Ю.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Address for correspondence:

Kaniukov E.Yu.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: Ka.egor@mail.ru

Для цитирования:

Каниюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Кутузав М.Д., Боржекков Д.Б., Кенжина И.Е., Козловский А.Л., Здоровец М.В.

Ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран для элементов гибкой электроники.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 214–221.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

For citation:

Kaniukov E.Yu., Shumskaya E.E., Kutuzau M.D., Borgekov D.B., Kenzhina I.E., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V.

[Ferromagnetic Nanotubes in Pores of Track Membranes for the Flexible Electronic Elements].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 214–221 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-214-221

Введение

В настоящее время ведется активный поиск новых технологий, которые позволяют уменьшать размеры электронных приборов до нанометрового диапазона. В этой связи возрастает интерес к развитию недорогих и масштабируемых способов получения наноструктур и их массивов. Перспективным является метод шаблонного синтеза, в котором шаблоны изготавливаются с использованием технологии треков быстрых тяжелых ионов за счет формирования в различных материалах узких и протяженных областей радиационного повреждения (латентных треков) [1]. Такие области после селективного травления трансформируются в цилиндрические или конические поры с диаметром 10–1000 нм и длиной до сотен микрон. Большая часть потенциальных применений технологии ионных треков связана с изготовлением сенсоров температуры, давления, потока жидкости, напряженности магнитного поля, влажности и т.д. [2]. Идея создания таких сенсоров отличается достаточно простым подходом: нанопоры в диэлектрическом слое заполняются чувствительным к определенному роду воздействиям материалом.

При использовании ионно-трековой технологии шаблоны могут представлять собой как жесткую матрицу (например, SiO_2/Si , PI/Si и др. [3, 4]), так и гибкую полимерную пленку. При использовании гибких шаблонов актуальной становится задача создания устройств «гибкой электроники», которая появилась в 1980-х годах и получила значительное распространение в последние годы благодаря развитию инструментальной базы и интенсивным междисциплинарным исследованиям в области химии, физики и материаловедения. Эта технология имеет потенциал для производства светоизлучающих диодов [5, 6], радиочастотных идентификационных меток и даже интегральных схем [7], которые будут дешевле и эффективнее, чем изготавливаемые в настоящее время на базе стандартной кремниевой технологии.

В настоящее время предлагаются решения для гибкой электроники на основании нанопроволок. Например, в работе [8] показана методика создания датчика давления на основании гибкой пленки с серебряными нанопроволоками, в работе [9] – концепция реализации дисплеев и тачскринов. Также предлагается гибкий полимерный электролитный топливный элемент с использованием высокоэластичных токоприемников для перколяционной сетки серебряных нанопроволок [10], но-

симые датчики магнитного поля [11], биосенсоры [12, 13] и др. Несмотря на большое количество работ, нацеленных на использование нанопроволок в устройствах гибкой электроники, применения металлических нанотрубок в таких устройствах не рассматривалось. Тем не менее нанотрубки за счет наличия внутри полого канала в сравнении с нанопроволоками могут иметь достаточно существенные преимущества для использования в устройствах гибкой электроники. К сожалению, объем информации о структуре и магнитных свойствах нанотрубок на сегодняшний день недостаточен, а работы по использованию нанотрубок при конструировании элементов гибкой электроники практически отсутствуют. В связи с этим целью данной работы являлось рассмотрение особенностей синтеза ферромагнитных нанотрубок из железа, кобальта и никеля в порах полиэтилентерефталатового ионно-трекового шаблона, а также изучение их структурных и магнитных свойств для определения потенциальной возможности применения в элементах гибкой электроники.

Методика

Существуют различные методы синтеза ферромагнитных нанотрубок: термический синтез, золь-гель, испарительно-конденсационный, химическое осаждение и метод шаблонного синтеза. Наиболее простым из представленного ряда является шаблонный синтез, который позволяет создавать наноструктуры с большим аспектным соотношением и подразумевает электрохимическое осаждение в поры различных матриц (шаблонов) [14–16]. В качестве шаблонов обычно используются анодированный оксид алюминия (ААО) [17, 18], мезопористый кремний [19], диоксид кремния [3, 20] или полимерные мембраны [5, 21]. Учитывая, что в настоящей работе рассматривается потенциальная возможность создания элементов гибкой электроники, в качестве шаблонов использовались полиэтилентерефталатовые (ПЭТФ) трековые мембраны толщиной 12 мкм с номинальным диаметром пор 110 нм и плотностью $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Особенности получения таких шаблонов рассмотрены в работах [22, 23].

Электрохимическое осаждение проводилось в потенциостатическом режиме в двухэлектродной ячейке при напряжении 1,5 В. Катод представлял собой золотую пленку на задней поверхности ПЭТФ-шаблона толщиной 10 нм. Толщина катода была мала для перекрытия пор, но достаточна для образования кольца вокруг поры,

которое задавало рост полых нанотрубок [20]. В качестве электролитов использовались следующие растворы: для синтеза железных нанотрубок: $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ (180 г/л), $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (5 г/л), H_3BO_3 (25 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (3 г/л); кобальтовых: $\text{CoSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ (120 г/л), H_3BO_3 (45 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (3 г/л); и никелевых: $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$ (120 г/л), H_3BO_3 (3 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (1,5 г/л) при температуре 25 °С; pH электролита равнялся 3. Некоторые особенности создания ферромагнитных нанотрубок рассматривались нами в работах [14, 20, 21].

Структурные особенности определялись при помощи методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, *Hitachi TM3030*), энерго-дисперсионного анализа (ЭДА, *Bruker XFlash MIN SVE*) и рентгеноструктурного анализа (РСА, *Bruker D8 ADVANCE*). Контроль внутренних диаметров пор и оценка толщины стенок проводились методами газопроницаемости (*Sartocheck® 3 Plus 16290*). Магнитные характеристики нанотрубок из Fe, Co и Ni изучались на автоматизированном вибрационном магнитометре (*Cryogenic LTD*) в магнитных полях ± 3 Т при комнатной температуре.

Основная часть

Получение нанотрубок из железа, кобальта и никеля осуществлялось методом шаблонного синтеза включающего электрохимическое осаждение металлов в поры ПЭТФ-шаблона. Процесс обычно состоит из 4 стадий: зародышеобразования (I), активного роста нанотрубок (II), образования «крышек» на поверхности нанотрубок (III) и формирования непрерывной металлической пленки на поверхности шаблона (IV) [24, 25]. Непосредственное формирование нанотрубок происходит на первых двух этапах электроосаждения. Первая стадия соответствует началу заполнения пор шаблона, когда при введении электрического поля на кольцевом электроде в нижней части поры образуются зародыши металла, повторяющие форму электрода и задающие форму будущей нанотрубки. Одновременно происходит формирование зародышей в активных зонах на поверхности стенок пор (содержащих дефекты, оборванные связи и др.), образующихся при химической или физической активации (например, в процессе формирования пор в ионно-трековых мембранах) [26]. Интенсивное образование зародышей вызывает снижение концентрации ионов металла внутри поры.

На второй стадии происходит непосредственный рост нанотрубок внутри пор вплоть

до достижения поверхности ПЭТФ-мембран. Поскольку диффузия ионов в пору происходит достаточно медленно, рост нанотрубок осуществляется за счет последовательного наложения двумерных зародышей на поверхности кольцевого наконечника [27]. Чтобы ионы металла, участвующие в росте нанотрубок, могли достичь катода, им необходимо преодолеть обедненную область, т.е. через узкий канал поры попасть из области с высокой концентрацией в область с низкой. Учитывая, что скорость движения ионов к активной зоне задается условиями осаждения, увеличение как напряжения, так и температуры синтеза приводит к ускорению роста нанотрубок. При этом усиливается выделение газа, который скапливаясь во внутренней полости нанотрубок, блокирует доступ туда ионов металла [28], что способствует формированию осадка вблизи стенок пор. Соответственно, повышение напряжения и/или температуры электрохимического синтеза вызывает уменьшение толщины стенок нанотрубок, что и было показано в работе [20]. Стоит отметить, что уменьшая разность потенциалов и/или температуру синтеза, можно существенно снизить выделение водорода, благодаря чему можно добиться получения нанопроволок.

В работе для синтеза нанотрубок было выбрано напряжение 1,5 В, которое обеспечивало с одной стороны формирование полых формы наноструктур, а с другой – довольно высокую скорость процесса осаждения. Результаты синтеза ферромагнитных нанотрубок (Fe, Co и Ni) представлены на рисунке 1.

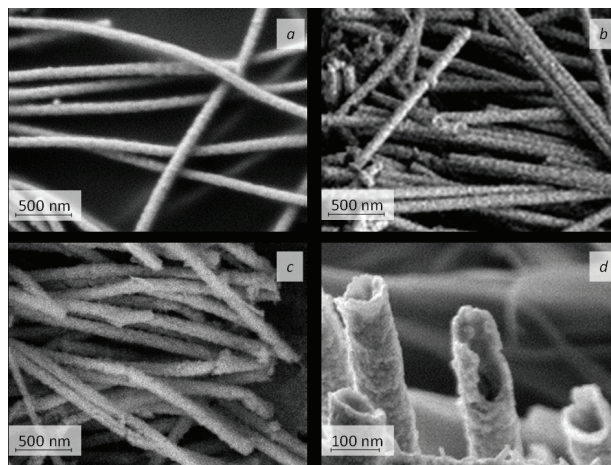


Рисунок 1 – СЭМ-изображения массива ферромагнитных нанотрубок после растворения ПЭТФ-шаблона: а – Fe; б – Co; в – Ni; д – сломы отдельных Ni нанотрубок

Figure 1 – SEM-images of array of ferromagnetic nanotubes after PET template dissolution: а – Fe; б – Co; в – Ni; д – crashed individual Ni nanotubes

СЭМ-изображения (рисунки 1а–с) показывают, что наноструктуры, полученные из разных металлов, имеют схожую морфологию. Синтезированные в порах ПЭТФ-шаблонов Fe, Co и Ni нанотрубки имеют наружный диаметр 110 ± 10 нм и длину $12 \pm 0,2$ мкм. Из изображений сломов наноструктур видно, что они имеют трубчатую форму (рисунок 1d). Методом газопроницаемости установлено, что внутренние диаметры нанотрубок составляют 70 ± 10 нм, что соответствует толщине стенок 20 ± 5 нм. Стоит отметить, что наличие полого канала внутри нанотрубок дает возможность синтеза внутри от-

дельной поры ионно-трековой мембраны многослойных элементов, в которых одна трубка будет помещена внутрь другой, что позволит реализовывать такие устройства, как наноконденсаторы и различные сенсоры.

Определение элементного состава нанотрубок проводилось с помощью ЭДА-спектроскопии (рисунок 2а–с). Исходя из результатов анализа спектров ЭДА, атомная металлическая композиция соответствовала 100 % Fe, 100 % Co и 100 % Ni без оксидов и примесей. Кристаллическая структура нанотрубок определялась на основе анализа спектров РСА (рисунок 2d–f).

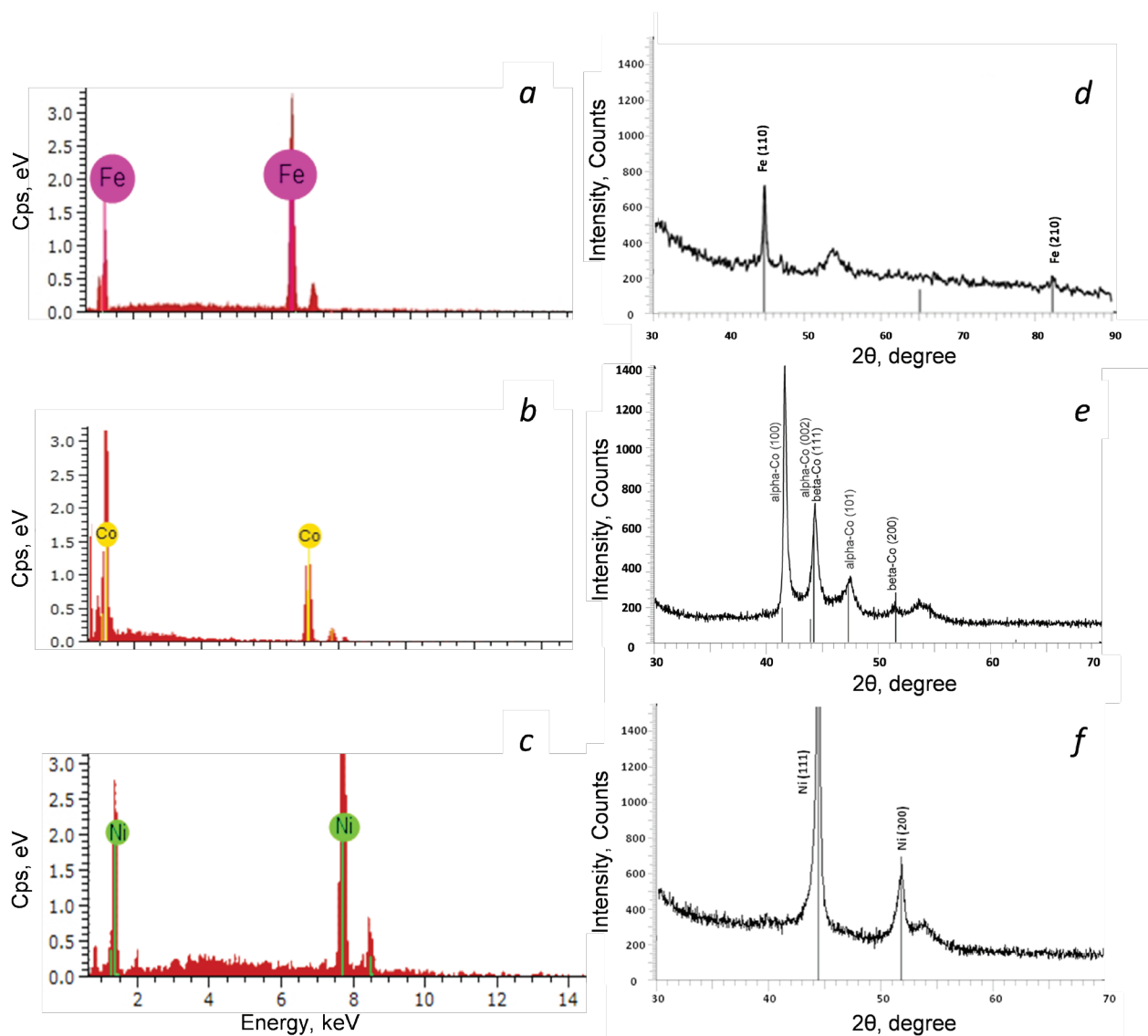


Рисунок 2 – ЭДА (а–с) и РСА (d–f) спектры нанотрубок: Fe (a, d); Co (b, e); Ni (c, f)

Figure 2 – EDA (a–c) spectra and XRD patterns (d–f) of nanotubes: Fe (a, d); Co (b, e); Ni (c, f)

Тип кристаллической решетки, параметр элементарной ячейки, а также средний размер кристаллитов синтезированных на-

нотрубок были определены согласно уравнениям, приведенным в [14], и приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры кристаллической структуры нанотрубок

The main structural parameters of nanotubes

Параметр Parametr	Fe	Co		Ni
		α -Co	β -Co	
Тип кристаллической решетки Type of crystal lattice	ОЦК BCC	ГЦК FCC	ГЦК FCC	ГЦК FCC
Параметр элементарной ячейки, Å Unit cell parameter, Å	2,8563	2,5007	3,5428	3,5223
Средний размер кристаллитов, нм Average crystallite size, nm	16,84	18,11	22,64	

Измерения зависимости намагниченности от магнитного поля $M(H)$ проводились для параллельной и перпендикулярной ориентации направлений поля относительно главной оси нанотрубок (рисунок 3). На основе петель гистерезиса определялись основные магнитные характеристики (H_c – коэрцитивность, M_r/M_s – коэффициент квадратичности петель гистерезиса), которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Основные магнитные характеристики ферромагнитных нанотрубок, снятые при различном направлении поля относительно главной оси нанотрубки

The main magnetic properties of ferromagnetic nanotubes, obtained in case of different field direction with regard to nanotube main axis

Материал нанотрубки Material of nanotubes	Параллельно нанотрубке Parallel to nanotube		Перпендикулярно нанотрубке Perpendicular to nanotube	
	H_c , Oe	M_r/M_s	H_c , Oe	M_r/M_s
Fe	560	0,46	200	0,41
Co	510	0,14	450	0,25
Ni	300	0,48	20	0,03

Исследования магнитных характеристик массивов нанотрубок из Fe, Co и Ni показывают, что для всех материалов петли гистерезиса имеют схожий характер. Основные магнитные параметры нанотрубок при различных направлениях магнитного поля относительно оси нанотрубок отличаются, что свидетельствует о наличии магнитной анизотропии в образцах. Из данных в таблице 2 видно, что коэффициент коэрцитивности и квадратичности петель для Fe и Ni при параллельной ориентации выше, чем значения для перпендикулярного направления поля. Для Co значения квадратичности для перпендикулярной ориентации превышают значения для параллельной. Наблю-

даемую в эксперименте анизотропию магнитных свойств можно объяснить либо кристаллической анизотропией, которая подтверждается данными PCA (рисунок 2d-f), либо анизотропией формы, обусловленной тем, что во внешнем магнитном поле нанотрубкам с высоким аспектным соотношением (~100) требуется более высокая энергия размагничивания при ориентации поля вдоль оси, чем в перпендикулярном направлении.

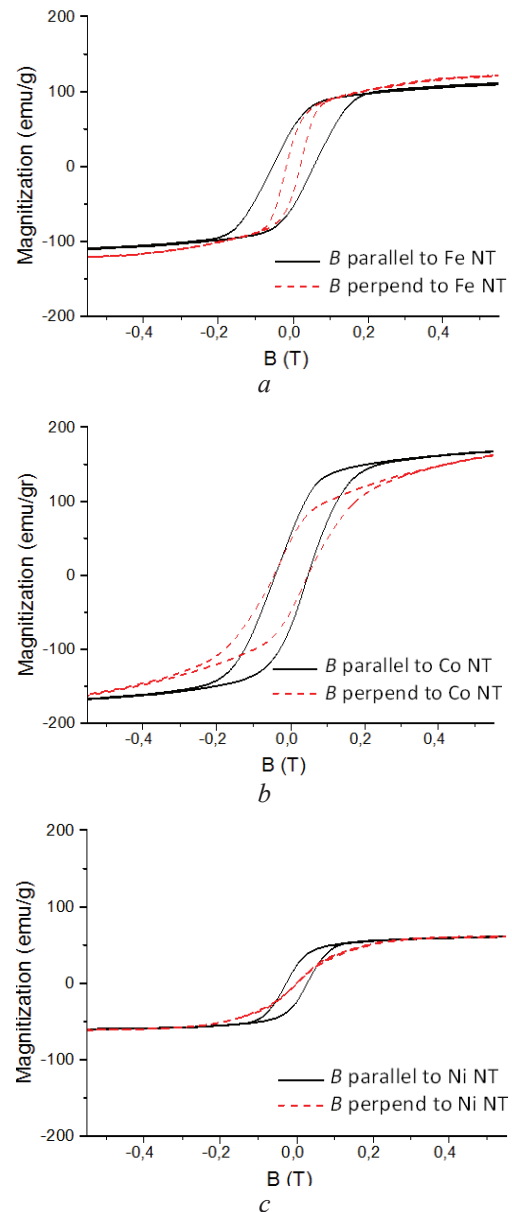


Рисунок 3 – Петли гистерезиса Fe (a); Co (b); Ni (c) нанотрубок, снятые при комнатной температуре. Черной сплошной линией изображены зависимости снятые при приложении поля параллельно главной оси нанотрубки, красной пунктирной – перпендикулярно

Figure 3 – Hysteresis loops of Fe (a); Co (b); Ni (c) nanotubes obtained at room temperature. Black continuous line shows the dependence obtained in case of the parallel to the main nanotube axis field, red dotted – perpendicular

Обнаруженная при изучении петель гистерезиса зависимость магнитных свойств позволяет рассматривать ферромагнитные нанотрубки в порах трековых мембран в качестве датчиков направления магнитного поля. Такие датчики обладают не только простой конструкцией, но и за счет использования в качестве основы гибкой полиэтилентерефталатовой подложки могут применяться на подвижных и сложнопрофильных поверхностях. Также следует отметить, что ввиду отсутствия магнитной сердцевины в нанотрубках, энергетически выгодными (стабильными) являются два состояния: когда линии магнитного поля направлены вдоль оси нанотрубки либо когда они замыкаются внутри стенок в направлении, перпендикулярном оси. Наличие двух стабильных состояний позволяет говорить об однородных полях магнитной коммутации. Кроме того, этим стабильным состояниям могут быть условно присвоены значения «1» или «0», что позволяет задуматься о возможности использования таких наноструктур в качестве элементов магнитной памяти.

Заключение

Железные, кобальтовые и никелевые нанотрубки диаметром 110 нм и толщиной стенки 20 нм были синтезированы методом электрохимического осаждения в порах ионно-трековых полиэтилентерефталатовых мембран. Изучение элементного состава показало, что нанотрубки состоят из чистых металлов без оксидов и примесей, а анализ кристаллической структуры позволил установить, что нанотрубки имеют поликристаллическую структуру стенок с объемно-центрированной кубической (железные), гране-центрированной кубической (кобальтовые и никелевые) кристаллической решеткой. Исследования основных магнитных характеристик нанотрубок при комнатной температуре позволили установить магнитную анизотропию, связанную с анизотропией формы, наблюдающуюся при высоких аспектных отношениях наноструктур.

Морфология нанотрубок за счет наличия полого канала позволяет рассматривать их как базовый элемент для реализации внутри отдельной поры ионно-трековой мембраны многослойных элементов, в которых одна трубка помещается внутри другой. Это позволяет реализовывать такие устройства, как наноконден-

саторы и датчики, чувствительные к внешним воздействиям.

Анизотропия магнитных свойств нанотрубок дает возможность рассматривать их в качестве датчиков направления магнитного поля, а отсутствие у нанотрубок магнитного сердечника будет обеспечивать предсказуемое распределение магнитного поля и однородные поля коммутации при их использовании в качестве элементов магнитной памяти.

Таким образом, что использование ферромагнитных нанотрубок в порах трековых мембран при конструировании элементов гибкой электроники позволит упростить конструкцию многих элементов и реализовывать устройства, которые можно применять на подвижных и сложнопрофильных поверхностях.

References

1. Fink D. Fundamentals of Ion-Irradiated Polymers: Fundamentals and Applications. Vol. 1. *Berlin–Heidelberg: Springer*, 2004. doi: 10.1007/978-3-662-07326-1
2. Apel P.Y., Dmitriev S.N. Micro- and nanoporous materials produced using accelerated heavy ion beams. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 13002. doi: 10.1088/2043-6262/2/1/013002
3. Kaniukov E.Y., Ustarroz J., Yakimchuk D.V., Petrova M., Terryn H., Sivakov V., Petrov A.V. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, no. 11, pp. 115305. doi: 10.1088/0957-4484/27/11/115305
4. Hoppe K., Fahrner W.R., Fink D., Dhamodaran S., Petrov A., Chandra A., Saad A., Faupel F., Chakravadhanula V.S.K., Zaporotchenko V. An ion track based approach to nano- and micro-electronics. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. B*, 2008, vol. 266, no. 8, pp. 1642–1646. doi: 10.1016/j.nimb.2007.12.069
5. Hulteen J.C., Martin C.R. A general template-based method for the preparation of nanomaterials. *J. Mater. Chem.*, 1997, vol. 7, no. 7, pp. 1075–1087. doi: 10.1039/a700027h
6. Mitchell D.T., Lee S.B., Trofin L., Li N., Nevanen T.K., Söderlund H., Martin C.R. Smart Nanotubes for Bioseparations and Biocatalysis. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, vol. 124, no. 40, pp. 11864–11865. doi: 10.1021/ja027247b
7. Park J.H., Lee D.Y., Kim Y.-H., Kim J.K., Lee J.H., Park J.H., Lee T.-W., Cho J.H. Flexible and Transparent Metallic Grid Electrodes Prepared by Evaporative Assembly. *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 2014, vol. 6, no. 15, pp. 12380–12387. doi: 10.1021/am502233y
8. Wang J., Jiu J., Nogi M., Sugahara T., Nagao S., Koga H., He P., Suganuma K. A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric in-

- terlayer containing silver nanowires. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, no. 7, pp. 2926–2932. doi: 10.1039/C4NR06494A.
9. Jiu J., Sukanuma K. Metallic Nanowires and Their Application. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, 2016, vol. 6, no. 12, pp. 1733–1751. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2581829
10. Chang I., Park T., Lee J., Lee M.H., Ko S.H., Cha S.W. Bendable polymer electrolyte fuel cell using highly flexible Ag nanowire percolation network current collectors. *J. Mater. Chem. A*, 2013, vol. 1, no. 30, pp. 8541. doi: 10.1039/c3ta11699a
11. Melzer M., Mönch J.I., Makarov D., Zabala Y., Cañón Bermúdez G.S., Karnaushenko D., Baunack S., Bahr F., Yan C., Kaltenbrunner M., Schmidt O.G. Wearable Magnetic Field Sensors for Flexible Electronics. *Adv. Mater.*, 2015, vol. 27, no. 7, pp. 1274–1280. doi: 10.1002/adma.201405027
12. Cohen-Karni T., Timko B.P., Weiss L.E., Lieber C.M. Flexible electrical recording from cells using nanowire transistor arrays. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2009, vol. 106, no. 18, pp. 7309–7313. doi: 10.1073/pnas.0902752106
13. Patolsky F., Zheng G., Lieber C.M. Nanowire-Based Biosensors. *Anal. Chem.*, 2006, vol. 78, no. 13, pp. 4260–4269. doi: 10.1021/ac069419j
14. Kaniukov E.Y., Kozlovsky A.L., Shlimas D.I., Zdorovets M.V., Yakimchuk D.V., Shumskaya E.E., Kadyrzhanov K.K. Electrochemically deposited copper nanotubes. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 270–275. doi: 10.1134/S1027451017010281
15. Demyanov S.E., Kaniukov E.Y., Petrov A.V., Belonogov E.K., Streltsov E.A., Ivanov D.K., Ivanova Y.A., Trautmann C., Terryn H., Petrova M., Ustarroz J., Sivakov V. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 805–813. doi: 10.1134/S1027451014040326
16. Kozlovskiy A., Zhanbotin A., Zdorovets M., Manakova I., Ozerov A., Kiseleva T., Kadyrzhanov K., Rusakov V., Kanyukov E. Mossbauer research of Fe/Co nanotubes based on track membranes. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.*, 2016, vol. 381, pp. 103–109. doi: 10.1016/j.nimb.2016.05.026
17. Kalanda N.A., Gorokh G.G., Yarmolich M.V., Lozovenko A.A., Kanyukov E.Y. Magnetic and magnetoresistive properties of Al₂O₃–Sr₂FeMoO_{6-δ}–Al₂O₃ nano-heterostructures. *Phys. Solid State*, 2016, vol. 58, no. 2, pp. 351–359. doi: 10.1134/S1063783416020128
18. Wang X.W., Yuan Z.H., Fang B.C. Template-based synthesis and magnetic properties of Ni nanotube arrays with different diameters. *Mater. Chem. Phys.*, 2011, vol. 125, no. 1–2, pp. 1–4. doi: 10.1016/j.matchemphys.2010.08.083
19. Zhang F., Zhao D. Fabrication of ordered magnetite-doped rare earth fluoride nanotube arrays by nanocrystal self-assembly. *Nano Res.*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 292–305. doi: 10.1007/s12274-009-9027-6
20. Kozlovskiy A.L., Shlimas D.I., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Y., Zdorovets M.V., Kadyrzhanov K.K. Influence of electrodeposition parameters on structural and morphological features of Ni nanotubes. *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 118, no. 2, pp. 164–169, 2017. doi: 10.1134/S0031918X17020065
21. Shumskaya A.E., Kaniukov E.Y., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M. V., Rusakov V.S., Kadyrzhanov K.K. Structure and Physical Properties of Iron Nanotubes Obtained by Template Synthesis. *Phys. Solid State*, 2017, vol. 59, no. 4, pp. 784–790. doi: 10.1134/S1063783417040266
22. Kaniukov E.Y., Shumskaya E.E., Yakimchuk D.V., Kozlovskiy A.L., Ibragimova M.A., Zdorovets M.V. Evolution of the polyethylene terephthalate track membranes parameters at the etching process. *J. Contemp. Phys. (Armenian Acad. Sci.)*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 155–160. doi: 10.3103/S1068337217020098
23. Kozlovskiy A., Borgekov K., Zdorovets M., Arkhangelsky E., Shumskaya A., Kanukov E. [Application of ion-track membranes in processes of direct and reverse osmosis]. *Vestsi NAN Belarusi, Fiziko-tekhnicheskaya seriya* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physico-technical series], 2017, vol. 1, pp. 45–51 (in Russian).
24. Yoo B., Xiao F., Bozhilov K.N., Herman J., Ryan M.A., Myung N.V. Electrodeposition of thermoelectric superlattice nanowires. *Adv. Mater.*, 2007, vol. 19, no. 2, pp. 296–299. doi: 10.1002/adma.200600606
25. Motoyama M., Fukunaka Y., Sakka T., Ogata Y.H. Initial stages of electrodeposition of metal nanowires in nanoporous templates. *Electrochim. Acta*, 2007, vol. 53, no. 1, pp. 205–212. doi: 10.1016/j.electacta.2007.04.122
26. Bercu B., Enculescu I., Spohr R. Copper tubes prepared by electroless deposition in ion track templates. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 2004, vol. 225, no. 4, pp. 497–502. doi: 10.1016/j.nimb.2004.06.011
27. Graham L.M., Cho S., Kim S.K., Noked M., Lee S.B. Role of boric acid in nickel nanotube electrodeposition: a surface-directed growth mechanism. *Chem. Commun.*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 527–529. doi: 10.1039/C3CC47183G
28. Chowdhury T., Casey D.P., Rohan J.F. Additive influence on Cu nanotube electrodeposition in anodised aluminium oxide templates. *Electrochem. commun.*, 2009,

УДК 621.3.087.54

Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем

Ивашко А.М.¹, Кисель В.Э.², Кулешов Н.В.²

¹ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

²НИЦ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета,
пр. Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

Поступила 29.05.2017

Принята к печати 24.06.2017

Усовершенствованию характеристик лазеров для использования в измерительных приборах уделяется большое внимание. Одним из перспективных направлений по уменьшению массогабаритных характеристик и энергопотребления для твердотельных лазеров является использование диодной накачки и микрочип-конфигурации резонатора. Увеличение выходной мощности при сохранении качества лазерного пучка для данного класса излучателей затруднительно из-за тепловых эффектов, возникающих в активной среде при увеличении мощности накачки. Целью данной работы было исследование возможности увеличения выходной мощности микрочип-лазера, построенного по принципу мультипликации прокачиваемых зон, при сохранении качества генерируемого лазерного пучка, близкого к дифракционному.

Проведено исследование непрерывного микрочип-лазера с продольной диодной накачкой на основе кристалла Yb:YAG. В представленном лазере излучение от нескольких лазерных диодов фокусируется в отдельные области активного элемента (мультипликация прокачиваемых зон), что позволяет реализовать одновременную генерацию нескольких лазерных пучков. Предметом исследования были энергетические и пространственные характеристики генерируемых лазерных пучков.

Обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на энергетические и пространственные характеристики отдельного лазерного пучка и, как следствие, на характеристики суммированного излучения. Определены зависимости изменения выходной мощности лазера от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. При одинаковой мощности накачки мощность отдельного лазерного пучка уменьшается с уменьшением расстояния между прокачиваемыми зонами и при увеличении их количества с одновременным улучшением качества генерируемого лазерного пучка.

Эффект взаимного влияния прокачиваемых зон Yb:YAG микрочип-лазера позволил получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей.

Ключевые слова: микрочип-лазер, качество лазерного пучка, продольная диодная накачка.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

Адрес для переписки:

Ивашко А.М.

ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

Address for correspondence:

Ivashko A.M.

JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

Для цитирования:

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.

Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 222–227.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

For citation:

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.

[Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 222–227 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications

Ivashko A.M.¹, Kisel V.E.², Kuleshov N.V.²

¹JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

²Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University,

Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 29.05.2017

Accepted for publication 24.06.2017

Abstract

Characteristics optimization of lasers used in different measuring systems is of great interest up to now. Diode-pumped microchip lasers is one of the most perspective ways for development of solid-state light sources with minimal size and weight together with low energy power consumption. Increasing of output power with good beam quality is rather difficult task for such type of lasers due to thermal effects in the gain crystal under high pump power.

The investigation results of continuous-wave longitudinally diode-pumped Yb:YAG microchip laser are presented. In the presented laser radiation from multiple pump laser diodes were focused into the separate zone in one gain crystal that provides simultaneous generation of multiple laser beams. The energy and spatial laser beam characteristics were investigated.

Influence of neighboring pumped regions on energy and spatial laser beams parameters both for separate and for sum laser output was observed. The dependences of laser output power from distance between neighboring pumped regions and their number were determined. Decreasing of laser output power was demonstrated with corresponding distance shortening between pumped regions and increasing their quantity with simultaneous improvement of laser beam quality.

Demonstrated mutual influence of neighboring pumped regions in the longitudinally diode pumped Yb:YAG microchip laser allow as to generate diffraction limited Gaussian beam with 2W of continuous-wave output power that 30 % higher than in case of one pumped zone.

Keywords: microchip laser, quality of the laser beam, longitudinally diode pumping.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

Адрес для переписки:

Ивашко А.М.

ОАО «Пеленг»,

ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

Address for correspondence:

Ivashko A.M.

JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus

e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com

Для цитирования:

Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.

Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 222–227.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

For citation:

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.

[Power Scaling in Continuous-Wave Yb:YAG Microchip Laser for Measuring Applications].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 222–227 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-222-227

Введение

Свойства лазерного излучения позволяют значительно улучшить характеристики существующих приборов и разрабатывать новые, параметры которых не могут быть получены при использовании обычных источников света. В измерительных приборах, где необходимо сосредоточить энергию излучения в небольшом телесном угле и узком спектральном интервале, преимущество использования лазеров в качестве источника излучения очевидно: повышается чувствительность прибора, упрощается оптическая система приборов, значительно упрощается интерпретация полученной информации [1]. Поэтому уделяется большое внимание разработке лазеров для измерительных приборов и усовершенствованию их характеристик, в частности снижению массогабаритных характеристик и энергопотребления.

Твердотельные лазеры достаточно часто применяются в измерительной технике [2–6], например в лазерно-индуцированной плазменной спектроскопии (LIPS), мониторинге окружающей среды, дальнометрии, определении оптических характеристик материалов и др. Одним из перспективных направлений по уменьшению массогабаритных характеристик и энергопотребления для твердотельных лазеров является использование диодной накачки в сочетании с микрочип конфигурацией резонатора [7]. На пространственный профиль генерируемого излучения для большинства микрочип-лазеров значительное влияние оказывают тепловые эффекты [8]. Поэтому масштабирование выходной мощности в широких пределах при необходимости получения близкой к дифракционной расходимости и Гауссова пространственного профиля лазерного пучка, что соответствует генерации на основной TEM_{00} моде, для данного класса лазеров является затруднительным. При увеличении мощности накачки для повышения выходной мощности из-за тепловых эффектов диаметр фундаментальной моды становится значительно меньше, чем диаметр пучка накачки, и происходит переход в многомодовый режим генерации [7] с соответствующим снижением пространственного качества излучения.

В нашей предыдущей работе [9] для реализации измерительного прибора для определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов описан компактный микрочип-лазер с диодной накачкой на основе кристалла

Yb:YAG, построенный по принципу мультипликации прокачиваемых зон [10] и генерирующий два осесимметричных лазерных пучка с максимальной выходной мощностью 1,5 Вт на каждый пучок при сохранении Гауссова пространственного профиля. Целью данной работы было расширение возможности применения разработанного лазера в измерительной технике и в других прикладных сферах за счет увеличения его выходной мощности при сохранении качества генерируемого лазерного пучка, близкого к дифракционному.

Основная часть

Принцип построения микрочип-лазера и его элементная база при исследованиях, результаты которых приведены в данной работе, аналогичны излучателю из работы [9]: излучение от нескольких лазерных диодов накачки с волоконным выводом фокусировалось с помощью оптической системы в отдельные, пространственно независимые друг от друга области активного элемента Yb:YAG, на торцах которого нанесены зеркала резонатора, являющиеся общими для всех прокачиваемых зон, в результате чего реализуется генерация нескольких лазерных пучков, количество которых равно количеству пучков накачки.

При прокачке только одной области микрочип-лазера при превышении уровня выходной мощности 1,5 Вт наблюдался переход в многомодовый режим генерации, что приводило к росту расходимости излучения и отступлению от Гауссова пространственного профиля, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на применимости разработанного излучателя в приложениях, требующих более высокой мощности. Пространственный профиль пучка генерации при мощности $P_{\text{вых}} = 1,5$ Вт и 2 Вт (в отдельном лазерном пучке) показан на рисунке 1.

При увеличении количества лазерных диодов накачки, а соответственно, и количества прокачиваемых областей при их одновременном включении было обнаружено влияние прокачиваемых зон друг на друга и на характеристики генерируемого излучения. В описанном ранее в работе [9] излучателе, в котором использовалось два лазерных диода накачки, данный эффект не был зафиксирован, т.к. излучатель предполагал поочередное задействование прокачиваемых областей и использование генерируемых лазерных пучков по отдельности.

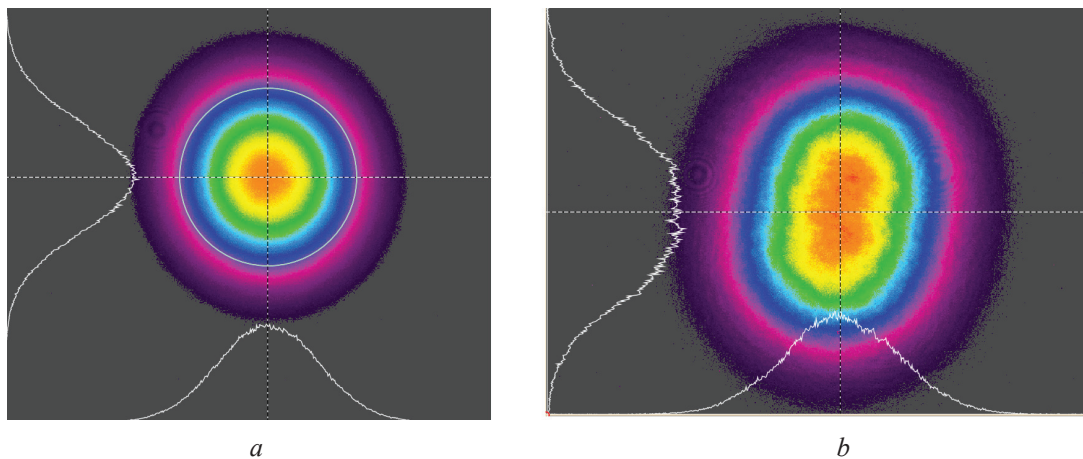


Рисунок 1 – Пространственный профиль лазерного пучка в отсутствие прокачки соседних областей: $a - P_{\text{вых}} = 1,5$ Вт; $b - P_{\text{вых}} = 2,0$ Вт

Figure 1 – Spatial shape of single laser beam without adjacent zone pumping: $a - P_{\text{out}} = 1,5$ W; $b - P_{\text{out}} = 2,0$ W

Было установлено, что задействование соседних прокачиваемых зон оказывает влияние на энергетические характеристики отдельного лазерного пучка. Для удобства интерпретации взаимного влияния прокачиваемых зон на энергетические характеристики суммированного излучения нами был введен коэффициент влияния K_n , определяемый как:

$$K_n = \frac{P_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

где n – количество прокачиваемых областей; P_{Σ} – суммарная генерируемая мощность при прокачке n зон одновременно; P_i – мощность отдельного лазерного пучка в отсутствие прокачки соседних зон.

Если прокачиваемые зоны не влияют друг на друга, то коэффициент $K_n = 1$.

На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента K_2 при прокачке двух областей от расстояния x между центрами прокачиваемых зон при $P_i = 2,0$ Вт (для других значений P_i характер зависимости в количественном и качественном выражении был практически идентичным).

Ожидается, что влияние на выходную мощность уменьшается при увеличении расстояния между прокачиваемыми зонами. Поэтому необходимо удалять прокачиваемые области друг от друга на максимально возможное конструктивно и технологически расстояние для снижения эффекта взаимного влияния на энергетические характеристики.

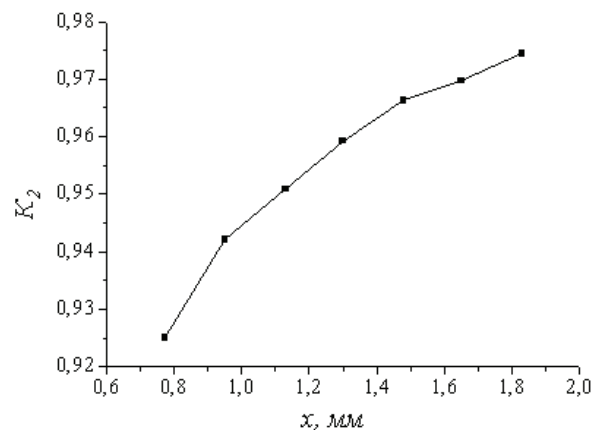


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента влияния K_2 от расстояния x между прокачиваемыми областями

Figure 2 – Dependence of coefficient K_2 from spacing x between two pumped regions

Кроме эффекта влияния прокачиваемых областей друг на друга, выражающегося в изменении мощности генерируемого излучения, был обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на пространственные характеристики генерируемого излучения.

На рисунке 3 показана эволюция пространственного профиля отдельного лазерного пучка (прокачиваемая зона № 1) при прокачке соседних зон в различных комбинациях. В скобках указана мощность лазерного пучка от прокачиваемой зоны № 1. Соседняя с зоной № 1 активная прокачиваемая область на рисунке 3 условно показана черным кругом. Пространственное расположение осей прокачиваемых областей внутри активного элемента в его поперечном сечении соответствовало вершинам квадрата с диагональю 1,4 мм.

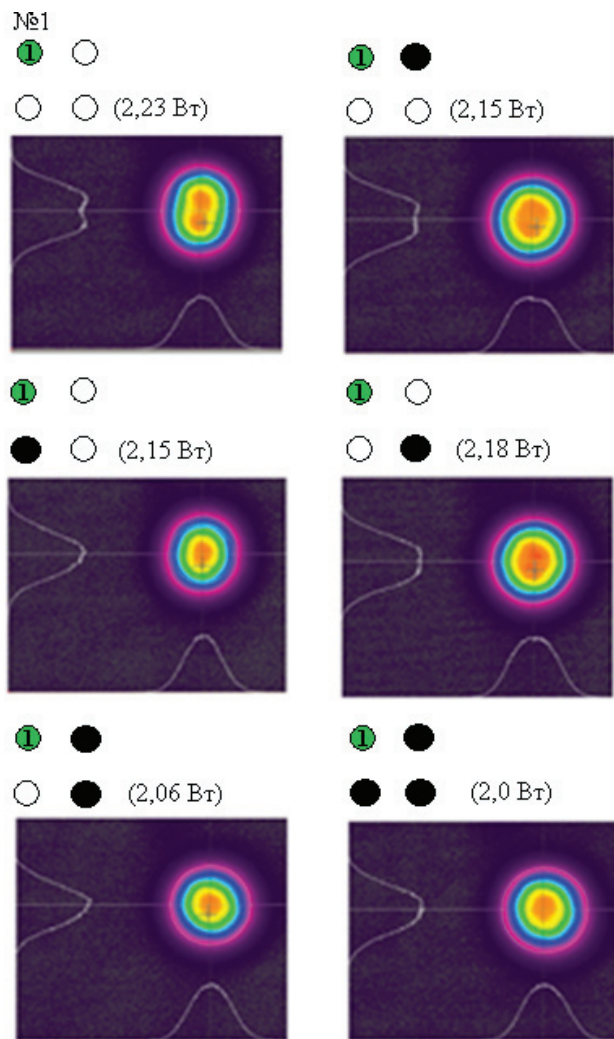


Рисунок 3 – Эволюция пространственного профиля отдельного лазерного пучка при прокачке соседних зон в различных комбинациях

Figure 3 – Evolution of spatial shape of single laser beam for various combination of neighboring pumped regions

Для пространственного профиля отдельного лазерного пучка при одновременной прокачке четырех зон было характерно Гауссово распределение интенсивности, что эквивалентно генерации на основной TEM_{00} моде (M^2 -фактор менее 1,2).

Значения мощности отдельного лазерного пучка при различных комбинациях прокачиваемых зон из эксперимента, результаты которого приведены на рисунке 3, позволяют определить зависимость коэффициента влияния K_n от количества прокачиваемых зон, которая близка к функции вида:

$$K_n = (K_2)^{n-1},$$

где K_n – суммарный коэффициент влияния при прокачке n зон ($n \geq 2$); K_2 – коэффициент влияния при прокачке двух зон.

Предположительно физической основой эффектов взаимного влияния отдельных прокачиваемых зон в активной среде является изменение распределения температуры в окрестности прокачиваемых областей, что приводит к изменению профиля показателя преломления в областях генерации и снижению величины aberrаций локально наведенной термолинзы.

Таким образом, прокачка соседних зон Yb:YAG микрочип-лазера позволила получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей. Дальнейшее увеличение выходной мощности при прокачке соседних областей приводило к распределению интенсивности, которое близко к П-образному, при этом не наблюдалось астигматизма в распределении и локальных провалов плотности мощности по всему поперечному сечению лазерного пучка.

Закключение

Установлено взаимное влияние соседних прокачиваемых зон на энергетические и пространственные характеристики отдельного лазерного пучка и, как следствие, на характеристики суммированного излучения для Yb:YAG микрочип-лазера, построенного по принципу мультипликации прокачиваемых областей. Определена зависимость изменения выходной мощности излучателя от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. Обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на пространственные характеристики генерируемого излучения. Установлено, что изменение суммарного пространственного распределения интенсивности обусловлено изменением пространственного профиля отдельного лазерного пучка при наличии прокачки соседних зон.

Эффект взаимного влияния прокачиваемых зон Yb:YAG микрочип-лазера позволил получить Гауссов профиль интенсивности отдельного лазерного пучка при мощности генерируемого излучения 2 Вт при прокачке четырех зон, что на 30 % больше, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей. Это позволяет расширить возможности практического применения излучателя в измерительной технике.

Список использованных источников

1. Андреев, А.Н. Оптические измерения / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин. – М. : Логос, 2008. – 416 с.
2. Gornushkin, I.B. Microchip laser-induced breakdown spectroscopy: preliminary feasibility investigation / I.B. Gornushkin [et al.] // *Appl. Spectrosc.* – 2004. – No. 58. – P. 762–769.
3. Hoehse, M. Assessment of suitable diode pumped solid state lasers for laser induced breakdown and Raman spectroscopy / M. Hoehse, I. Gornushkin, S. Merk, U. Panne // *J. Anal. At. Spectrom.* – 2011. – No. 26. – P. 414–424.
4. Moulton, P. Recent Advances in Solid State Lasers and Nonlinear Optics for Remote Sensing / P. Moulton [et al.] // *Proceedings of SPIE.* – 2003. – Vol. 4893. – P. 193–202.
5. Nejad, S.M. Low-Noise High-Accuracy TOF Laser Range Finder / S.M. Nejad, S. Olyaei // *American Journal of Applied Sciences.* – 2008. – No. 5 (7). – P. 755–762.
6. Karavanskii, V.A. Linear and nonlinear optical properties of gold-doped porous glass / V.A. Karavanskii, V.I. Krasovskii // *Proc. of SPIE.* – 2006. – Vol. 6344. – 63442M-1 (6 p.).
7. Denker, B. Handbook of solid-state lasers. Materials, systems and applications / B. Denker, E. Shklovsky. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. – 660 p.
8. Zayhowski, J. Thermal guiding in microchip lasers / J. Zayhowski, H. Jenssen, G. Dube // *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers.* – 1991. – No. 6. – P. 9–13.
9. Ивашко, А.М. Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // *Приборы и методы измерений.* – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 49–54.
10. Осветительная система : пат. 19694 Респ. Беларусь, МПК G 02 F 1/01 / В.В. Батюшков [и др.]; заявитель ОАО «Пеленг». – № а20121492 ; заявл. 26.10.2012 ; опубл. 30.06.2014 // *Официальный бюл. / Нац. центр интелект. собственности.* – 2014. – 6 с.

References

1. Andreev A.N. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008, 416 p.
2. Gornushkin I.B., Amponsah-Manager K., Smith B.W., Omenetto N., Winefordner J.D. Microchip laser-induced breakdown spectroscopy: preliminary feasibility investigation. *Appl. Spectrosc.*, 2004, no. 58, pp. 762–769. doi: 10.1366/0003702041389427
3. Hoehse M., Gornushkin I., Merk S., Panne U. Assessment of suitable diode pumped solid state lasers for laser induced breakdown and Raman spectroscopy. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, no. 26, pp. 414–424. doi: 10.1039/C0JA00038H
4. Moulton P., Dergachev A., Isyanova Y., Pati B., Rines G. Recent Advances in Solid State Lasers and Nonlinear Optics for Remote Sensing. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4893, pp. 193–202. doi: 10.1117/12.466664
5. Nejad S.M., Olyaei S. Low-Noise High-Accuracy TOF Laser Range Finder. *American Journal of Applied Sciences*, 2008, no. 5 (7), pp. 755–762. doi: 10.3844/ajassp.2008.755.762
6. Karavanskii V.A., Krasovskii V.I. Linear and nonlinear optical properties of gold-doped porous glass. *Proc. of SPIE*, 2006, vol. 6344, 63442M-1 (6 p.). doi: 10.1117/12.693656
7. Denker B., Shklovsky E. Handbook of solid-state lasers. Materials, systems and applications. Cambridge, Woodhead Publishing, 2013, 660 p.
8. Zayhowski J., Jenssen H., Dube G. Thermal guiding in microchip lasers. *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers*, 1991, no. 6, pp. 9–13.
9. Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V. [Method for determination of focal plane location of focusing components]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian). doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54
10. Batyshkov V.V., Vasilieva I.V., Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Kurilchik S.V., Litviakov S.B., Nemenenok A.I., Tareev A.M. *Osvetlitel'naya sistema* [Illumination system]. Patent BY, no. 19694, 2012.

УДК 538.958, 538.975

Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ -шаблона

Якимчук Д.В.¹, Каниуков Е.Ю.¹, Демьянов С.Е.¹, Бундюкова В.Д.¹, Дейнак А.В.²,
Макоед И.И.², Арзуманян Г.М.^{3,4}, Дорошкевич Н.В.³, Маматкулов К.З.³, Сиваков В.⁵

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

²Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина,
бульвар Космонавтов, 21, г. Брест 224016, Беларусь

³Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна 141980, Россия

⁴Государственный университет «Дубна»,
ул. Университетская, 19, г. Дубна 141980, Россия

⁵Институт фотонных технологий имени Лейбница,
ул. А. Эйнштейна, 9, г. Йена 07745, Германия

Поступила 18.07.2017

Принята к печати 23.08.2017

Гигантское комбинационное рассеяние, усиленное поверхностью, является мощным методом, применяемым в хемо- и биосенсорике. Целью данной работы являлось определение взаимосвязи сигнала гигантского комбинационного рассеяния света с формой серебряных наноструктур при воздействии лазерного излучения с различной мощностью.

Плазмонные наноструктуры синтезировались в порах диоксида кремния на подложке монокристаллического кремния n -типа, в котором поры формировались с использованием ионно-трековой технологии и селективного химического травления. Синтез серебра проводился методом безэлектродного осаждения. В качестве параметра, позволяющего управлять формой серебряного осадка в порах диоксида кремния на поверхности монокристаллического n -кремния при безэлектродном осаждении, выбрано время синтеза, которое непосредственно влияет на степень разрастания металлических наноструктур.

Анализ динамики изменения морфологии металлического осадка показал, что при увеличении времени осаждения металл эволюционирует от отдельных металлических кристаллитов внутри пор при малых временах осаждения до дендритоподобных наноструктур при больших временах. Изучена зависимость интенсивности спектров гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряного осадка при мощностях зеленого лазера ($\lambda = 532$ нм) от 2,5 до 150 мкВт на модельном анализе Родамин 6Ж. Проведен анализ оптимальной формы серебряного осадка и мощности лазера с точки зрения последующего конструирования активных поверхностей для гигантского комбинационного рассеяния света при неразрушающем контроле малых концентраций веществ.

Полученные серебряные наноструктуры в порах шаблона SiO_2 на кремниевой подложке n -типа могут использоваться в качестве плазмонно-активных поверхностей при неразрушающем исследовании низких концентраций веществ на малых мощностях лазера.

Ключевые слова: шаблонный синтез, серебряные наноструктуры, дендриты, «горячие точки», гигантское комбинационное рассеяние (ГКР).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

Адрес для переписки:

Якимчук Д.В.

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: dim2yakim@gmail.com

Address for correspondence:

Yakimchuk D.V.

Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: dim2yakim@gmail.com

Для цитирования:

Якимчук Д.В., Каниуков Е.Ю., Демьянов С.Е., Бундюкова В.Д.,
Дейнак А.В., Макоед И.И., Арзуманян Г.М., Дорошкевич Н.В.,
Маматкулов К.З., Сиваков В.

Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния
света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах
 $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ -шаблона.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 228–235.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

For citation:

Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Yu., Demyanov S.E., Bundyukova V.D.,
Dzeinak A.V., Makoeid I.I., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V.,
Mamatkulov K.Z., Sivakov V.

[Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on
the Shape of Silver Nanostructures Grown in the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ Porous
Template].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 228–235 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on the Shape of Silver Nanostructures Grown in the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ Porous Template

Yakimchuk D.V.¹, Kaniukov E.Yu.¹, Demyanov S.E.¹, Bundyukova V.D.¹, Dzeinak A.V.², Makoed I.I.², Arzumanyan G.M.^{3,4}, Doroshkevich N.V.³, Mamatkulov K.Z.³, Sivakov V.⁵

¹Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

²Brest State University named after A.S. Pushkin,
Kosmonavtov boulevard, 21, Brest 224016, Belarus

³Joint Institute for Nuclear Research,
Joliot-Curie str., 6, Dubna 141980, Russia

⁴State University «Dubna»,
Universitetskaya str., 19, Dubna 141980, Russia

⁵Leibniz-Institute of Photonic Technology,
Albert Einstein str., 9, Jena 07745, Germany

Received 18.07.2017

Accepted for publication 23.08.2017

Abstract

Surface-enhanced Raman scattering is a powerful method used in chemo- and biosensorics. The aim of this work was to determine the relationship between the signal of Surface-enhanced Raman scattering and the shape of silver nanostructures under the influence of laser radiation with different power.

Plasmonic nanostructures were synthesized in silicon dioxide pores on monocrystalline silicon *n*-type substrate. The pores were formed using ion-track technology and selective chemical etching. Silver deposition was carried out by galvanic displacement method. Synthesis time was chosen as a parameter that allows controlling the shape of a silver deposit in the pores of silicon dioxide on the surface of single-crystal *n*-silicon during electrodeless deposition. Deposition time directly effects on the shape of metal nanostructures.

Analysis of the dynamics of changing the morphology of the metal deposit showed that as the deposition time increases, the metal evolves from individual metallic crystallites within the pores at a short deposition time to dendritic-like nanostructures at a long time. The dependence of the intensity of Surface-enhanced Raman scattering spectra on the shape of the silver deposit is studied at the powers of a green laser ($\lambda = 532 \text{ nm}$) from $2.5 \text{ }\mu\text{W}$ to $150 \text{ }\mu\text{W}$ on the model dye analyte Rodamin 6G. The optimum shape of the silver deposit and laser power is analyzed from this point of view design of active surfaces for Surface-enhanced Raman scattering with nondestructive control of small concentrations of substances.

The silver nanostructures obtained in porous template SiO_2 on *n*-type silicon substrate could be used as plasmon-active surfaces for nondestructive investigations of substances with low concentrations at low laser powers.

Keywords: template synthesis, silver nanostructures, dendrites, «hot spots», SERS.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

Адрес для переписки:

Якимчук Д.В.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: dim2yakim@gmail.com

Address for correspondence:

Yakimchuk D.V.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: dim2yakim@gmail.com

Для цитирования:

Якимчук Д.В., Каниуков Е.Ю., Демьянов С.Е., Бундюкова В.Д., Дейнак А.В., Мakoед И.И., Арзуманян Г.М., Дорошкевич Н.В., Маматкулов К.З., Сиваков В.

Зависимость сигнала гигантского комбинационного рассеяния света от формы серебряных наноструктур, выращенных в порах $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ -шаблона.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 228–235.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

For citation:

Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Yu., Demyanov S.E., Bundyukova V.D., Dzeinak A.V., Makoed I.I., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V., Mamatkulov K.Z., Sivakov V.

[Dependence of the Surface-Enhanced Raman Scattering Signal on the Shape of Silver Nanostructures Grown in the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ Porous Template].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 228–235 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-228-235

Введение

На сегодняшний день весьма актуальным является создание активных поверхностей для усиления сигнала гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света при неразрушающем исследовании малых концентраций молекулярных соединений. Принцип действия таких поверхностей основан на том, что при воздействии внешней электромагнитной волны на границе металл-диэлектрик происходит значительное увеличение локальных электрических полей, что приводит к появлению «горячих точек» [1, 2]. Этот эффект широко используется для детектирования и исследования сверхмалых количеств вещества методом ГКР [3–6], усиленного поверхностью наноструктурированных плазмонных металлов: меди, серебра и золота [7, 8]. С точки зрения практического применения наиболее интересны наноструктуры (НС) из серебра, так как среди всех металлов они имеют наибольшее сечение экстинкции, большую коррозионную стойкость относительно медных НС и невысокую стоимость относительно золотых.

Оптические свойства плазмонных НС сильно зависят от их размера, формы, типа металла, окружающей среды и межчастичного взаимодействия [9, 10]. Выбор оптимальной формы и взаимного расположения НС позволяет получать необходимое усиление сигнала в ГКР-спектроскопии, а контролировать форму НС можно за счет использования пористых шаблонов при синтезе плазмонных НС. В этом случае диаметр поры определяет процесс нуклеации, форма поры задает направление роста кристаллитов, а время синтеза – степень разрастания НС [11–13]. С точки зрения усиления оптических свойств наиболее интересными являются структуры, имеющие наибольшее количество «горячих точек», которые образуются на неровностях поверхности и в местах соединения отдельных элементов структуры [16]. Принимая во внимание факторы, влияющие на усиление сигнала ГКР, можно предположить, что предпочтительной формой плазмонных НС будет форма дендрита. Учитывая склонность серебра к дендритизации [14, 15], при подборе оптимальных параметров шаблона и времени синтеза можно получить дендритоподобные структуры, взаимное расположение которых будет регулироваться поверхностной плотностью пор шаблона.

Таким образом, с точки зрения конструирования ГКР-активных поверхностей для неразрушающего исследования малых концентраций веществ интересным является установление взаимосвязи сигнала ГКР света с формой серебряных НС (Ag НС), выращенных в порах шаблона. С учетом того, что изучение зависимости оптических свойств от параметров серебряных НС со сложной формой поверхности носит отрывочный характер, целью нашей работы являлось получение Ag НС различной формы посредством шаблонного синтеза в порах SiO_2 на кремниевой подложке n -типа при различных временах осаждения, а также исследование эффективности таких структур в качестве ГКР-активных поверхностей на примере тестового анализатора – красителя Родамина 6Ж при различных мощностях лазера.

Методика

В качестве шаблонов для синтеза Ag НС использовали ионно-трековые пористые SiO_2 -матрицы толщиной 250 ± 10 нм на кремниевой подложке n -типа (КЭФ 4,5 Ом·см с ориентацией (100)) с внешними диаметрами пор 500 ± 20 нм. Плотность пор по поверхности составляла 10^8 см⁻². Особенности получения и характерные изображения поверхности и сколов SiO_2 -шаблонов на кремниевой подложке представлены в нашей работе [17]. Осаждение серебра проводилось методом безэлектродного осаждения из раствора 0,02 М нитрата серебра (AgNO_3) и 5 М плавиковой кислоты (HF) при нормальных условиях. Перед осаждением образцы шаблона $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ размером 4×4 мм² промывались в изопропиловом спирте и дистиллированной воде, после чего высушивались в потоке азота. Для установления динамики роста Ag НС в порах SiO_2 время осаждения подбиралось для каждого образца 5, 15, 30 и 60 с соответственно. По окончании процесса образцы промывались в дистиллированной воде, затем в изопропиловом спирту, снова в дистиллированной воде и высушивались на воздухе.

Морфология поверхности полученных образцов $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе TESCAN с приставкой для энергодисперсионного анализа (ЭДА). ГКР-исследования осуществлялись на CARS микроскопе («SOLAR TII», Japan-Belarus). Экспери-

мент проводился при использовании зеленого ($\lambda = 532$ нм) лазера с мощностями от 2,5 до 150 мВт и при времени экспозиции 0,5 с. В качестве тестового анализита использовался водный раствор красителя Родамин 6Ж ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) с концентрацией 10^{-6} М. Анализит наносился на образец, после чего в течении 10 мин высушивался на воздухе.

Основная часть

Серебряные НС, полученные при осаждении металла в поры SiO_2 на кремниевой подложке n -типа при различных временах осаждения,

представлены на рисунке 1. Контрастные СЭМ-изображения свидетельствуют о том, что металлический осадок присутствует практически во всех порах (рисунок 1а–д). Это позволяет сделать вывод о селективности процесса осаждения металла, который происходит исключительно в порах оксида кремния. Количество металлической фазы увеличивается пропорционально времени осаждения, при этом металлические НС пространственно разделены и не образуют непрерывных металлических дорожек даже при максимальном времени осаждения, однако начиная с 30 с регистрируется образование отдельных конгломератов из НС.

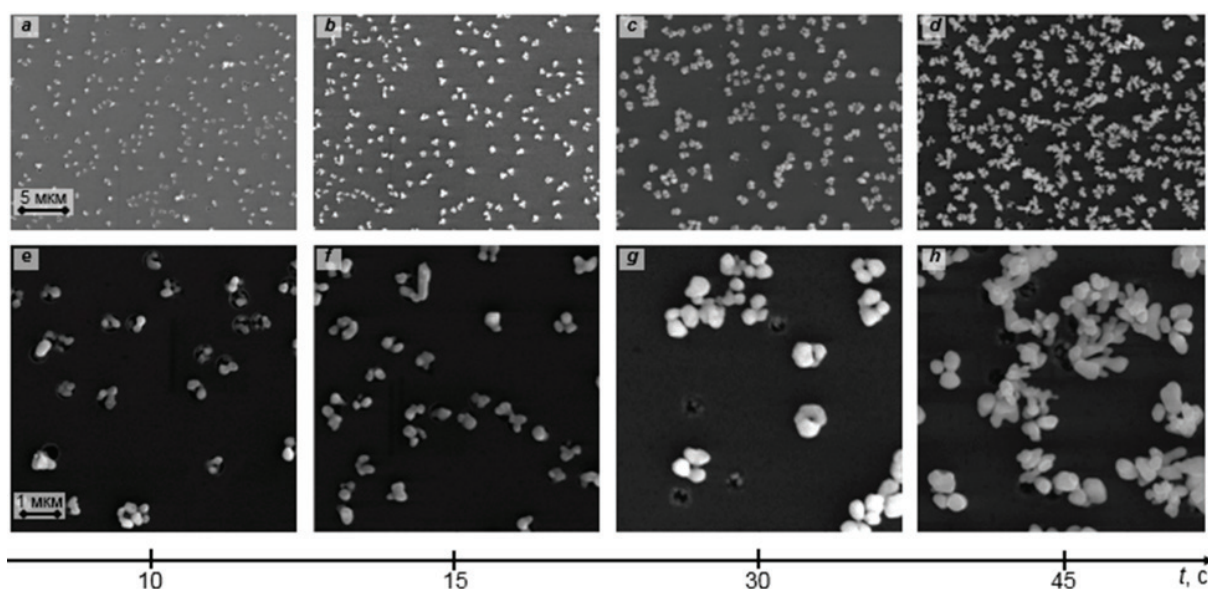


Рисунок 1 – Динамика роста серебряных наноструктур в порах SiO_2 на кремниевой подложке n -типа при временах осаждения: 5 с (а, е), 15 с (б, ф), 30 с (с, г) и 60 с (д, h). Снимки в каждом ряду сделаны при одинаковом увеличении

Figure 1 – The growth dynamics of silver nanostructures in SiO_2 pores on n -type silicon substrate at deposition times: 5 s (a, e), 15 s (b, f), 30 s (c, g) and 60 s (d, h). The scale is the same for each line

Изображения, полученные при большем увеличении (рисунок 1е–h), позволяют отследить динамику изменения морфологии отдельных НС при увеличении времени осаждения. Видно, что на начальных этапах (рисунок 1е) формируются отдельные центры роста металла по краям пор, без образования цельных НС. При этом, даже при столь малых временах осаждения, металлический осадок в порах дорастает до поверхности SiO_2 , что соответствует образованию отдельных кристаллитов с длиной до 250 нм. С увеличением времени осаждения металл начинает выступать над поверхностью оксида и средние размеры металлических кристаллитов увеличиваются до 300–350 нм (рису-

нок 1ф). Спустя еще 15 с кристаллиты не только укрупняются в размерах до 500–750 нм, но также в некоторых местах начинают конгломерировать с образованием взаимоперекрывающихся Ag НС, растущих из соседних пор (рисунок 1г). Осаждение в течение 45 с приводит к увеличению размеров кристаллитов с их двойникованием и образованием дендритоподобных структур (рисунок 1h).

Анализ элементного состава образцов $SiO_2(Ag)/n-Si$ (рисунок 2) подтверждает селективность осаждения металла в поры (на поверхности SiO_2 выпадения металла не происходит, рисунок 2б). Кроме того, из анализа ЭДА-спектров видно, что при осаждении металла в по-

рах не регистрируются фазы, соответствующие другим элементам (рисунок 2с), которые могут входить в состав металлического осадка

при безэлектродном осаждении. Пики кремния и кислорода соответствуют подложке, которая окружает Ag НС.

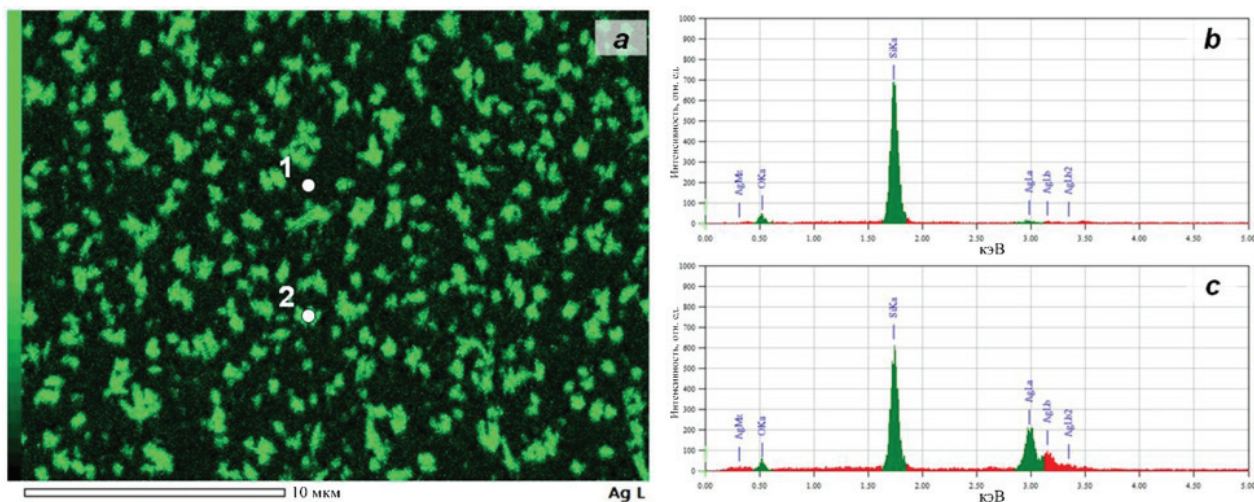


Рисунок 2 – ЭДА-картирование поверхности образцов $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$, полученных при осаждении серебра в течение 60 с (a), и ЭДА-спектры (b, c), соответствующие точкам 1 и 2

Figure 2 – EDA-mapping of the $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ surface for samples after silver deposition at 60 s (a), and EDA-spectra (b, c) corresponding to points 1 and 2

Достаточно близкое расположение серебряных кристаллитов позволяет предположить, что в местах их соприкосновения будут образовываться «горячие точки». Для подтверждения этого предположения проводились исследования образцов

$\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$, полученных при различных временах осаждения, на предмет эффективности их применения в качестве ГКР-активных поверхностей. На рисунке 3a представлены ГКР-спектры, полученные при мощности лазера в 150 мкВт.

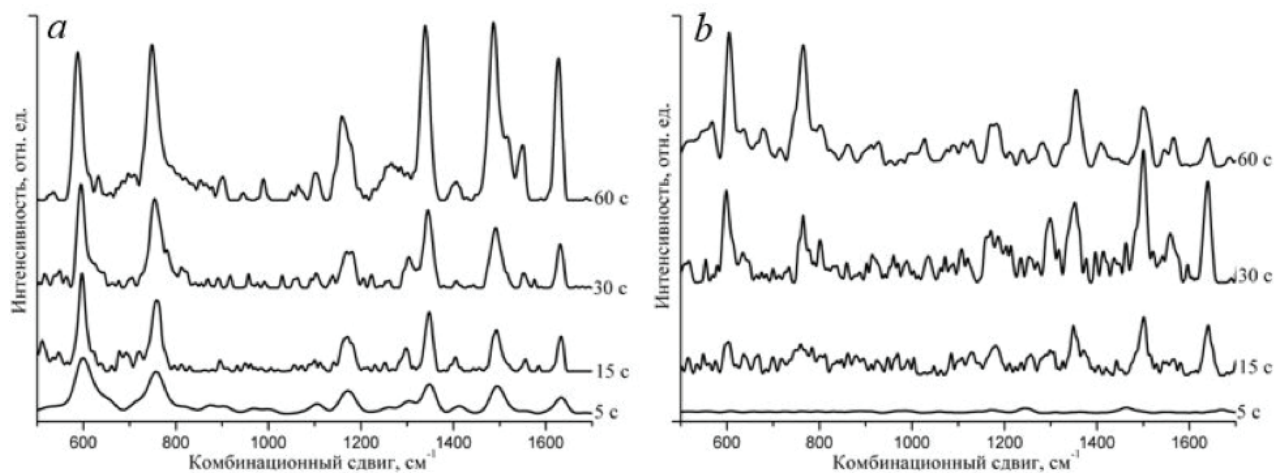


Рисунок 3 – ГКР-спектры Родамина 6Ж с концентрацией 10^{-6} М, снятые на серебряных наноструктурах, выращенных в порах SiO_2 на кремниевой подложке n -типа при времени осаждения 5 с, 15 с, 30 с и 60 с. a – спектры, полученные при мощности лазера 150 мкВт; b – при мощности 2,5 мкВт

Figure 3 – SERS spectra of Rhodamine 6G with a concentration of 10^{-6} M, measured on silver nanostructures grown in pores of SiO_2 on a silicon n -type substrate at a deposition time of 5 s, 15 s, 30 s and 60 s. a – spectra obtained at a laser power of 150 μW ; b – at a power of 2.5 μW

Основные линии спектров соответствуют используемому в эксперименте аналиту Родамину 6Ж. Спектры, полученные на Ag НС, выращенных при больших временах осаждения,

являются более интенсивными. Возрастание сигнала связано с изменением морфологии НС, ведущей к увеличению числа «горячих точек» за счет увеличения размера НС и образования

взаимных перекрытий, попадающих в поле лазера. Особенно сильно этот эффект проявляется на дендритоподобных НС, что позволяет сделать вывод об этих структурах как о наиболее подходящих для ГКР-спектроскопии среди рассматриваемых. Расчетная модель, иллюстрирующая распределение электрического поля на серебряном дендрите, представленная в работе [16], подтверждает наши предположения о местах локализации «горячих точек». Тем не менее, несмотря на относительно высокую интенсивность ГКР-сигнала, эксперименты показывают, что при мощности лазера 150 мкВт происходит постепенная деструкция анализа, в результате чего повторное детектирование ГКР-сигнала с того же участка НС становится затруднительным.

Так как повторная регистрация сигнала важна при проведении различных исследований (например, при анализе поведения раковых клеток и других биологических объектов с течением времени [18]), для предотвращения разрушения исследуемого вещества под действием внешнего возбуждения была подобрана минимальная мощность лазера, при которой устойчиво регистрируется сигнал – 2,5 мкВт. По данным серии экспериментов установлено, что при использовании данной мощности сигнал остается стабильным в течение длительного промежутка времени, что указывает на возможность проведения неразрушающих ГКР-исследований. При этом наилучшие результаты по усилению сигнала также были получены при использовании дендритоподобных Ag НС (рисунок 3b).

Заключение

Сформированы структуры $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ с различной формой металлического осадка посредством варьирования временем безэлектродного осаждения серебра в поры SiO_2 -шаблона на кремниевой подложке n -типа. При проведении исследований морфологии структур $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ показано, что серебряные наноструктуры растут исключительно в порах SiO_2 и форма осадка зависит от времени осаждения. Анализ динамики изменения морфологии металлического осадка показал, что при увеличении времени осаждения металл эволюционирует от отдельных металлических кристаллитов внутри пор при малых временах осаждения до дендритоподобных наноструктур при больших временах.

Изучение оптических свойств структур $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ позволило определить взаимосвязь сигнала ГКР с формой наноструктуры и показать влияние «горячих точек» на качество регистрируемого сигнала. Показано, что наноструктуры, выращенные при больших временах осаждения, имеют более интенсивные ГКР-спектры. Возрастание сигнала связано с изменением морфологии наноструктур, ведущим к увеличению числа «горячих точек» за счет увеличения размера наноструктур и образования взаимных перекрытий, попадающих в поле лазера. Особенно сильно этот эффект проявляется на дендритоподобных наноструктурах, что позволяет сделать вывод об этих структурах, как о наиболее подходящих для ГКР-спектроскопии среди рассматриваемых.

Проведено исследование эффективности использования структур $\text{SiO}_2(\text{Ag})/n\text{-Si}$ в качестве ГКР-активных поверхностей при различных мощностях лазера. Установлено, что при использовании возбуждения мощностью 150 мкВт происходит постепенное разрушение анализа. Понижение мощности лазера до 2,5 мкВт устраняет эту проблему. Таким образом, полученные серебряные наноструктуры в порах шаблона SiO_2 на кремниевой подложке n -типа могут использоваться в качестве ГКР-активных поверхностей при неразрушающем исследовании низких концентраций веществ на малых мощностях лазера.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф17М-005), гранта Национальной академии наук Беларуси (договор № 2017-26-010), Нетворка Балтийского моря «НаноФото» и Научно-технической программы «Технология СТ» (проект № 3.1.5.1).

Список использованных источников

1. Wei, H. Hot spots in different metal nanostructures for plasmon-enhanced Raman spectroscopy / H. Wei, H. Xu // *Nanoscale*. – 2013. – Vol. 5, no. 207890. – P. 10794–805.
2. Su, K.H. Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles / Su K.H. [et al.] // *Nano Lett.* – 2003. – Vol. 3, no. 8. – P. 1087–1090.
3. Kim, K. Surface-Enhanced Raman Scattering: A Powerful Tool for Chemical Identification / K. Kim, K.S. Shin // *Anal. Sci.* – 2011. – Vol. 27, no. 8. – P. 775.

4. Kneipp, K. Surface-enhanced raman scattering / K. Kneipp // *Phys. Today*. – 2007. – Vol. 60, no. 11. – P. 40–46.
5. Santoro, G. Silver substrates for surface enhanced Raman scattering: Correlation between nanostructure and Raman scattering enhancement / G. Santoro [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 104, no. 24. – P. 243107.
6. Wang, A. Review of Recent Progress of Plasmonic Materials and Nano-Structures for Surface-Enhanced Raman Scattering / A. Wang, X. Kong // *Materials (Basel)*. – 2015. – Vol. 8, no. 6. – P. 3024–3052.
7. Xia, Y. Plasmons: Why Should We Care? / Y. Xia, D.J. Campbell // *J. Chem. Educ.* – 2007. – Vol. 84, no. 1. – P. 91.
8. Sharma, B. SERS: Materials, applications, and the future / B. Sharma [et al.] // *Mater. Today*. – 2012. – Vol. 15, no. 1–2. – P. 16–25.
9. Хлебцов, Н.Г. Оптика и биофотоника наночастиц с плазмонным резонансом / Н.Г. Хлебцов // *Квантовая электроника*. – 2008. – Вып. 38, № 6. – С. 504–529.
10. Kumari, G. How Far Can We Probe by SERS? / G. Kumari [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. – 2015. – Vol. 119, no. 34. – P. 20057–20064.
11. Kaniukov, E. Growth mechanisms of spatially separated copper dendrites in pores of a SiO₂ template / E. Kaniukov [et al.] // *Philos. Mag.* – 2017. – Vol. 6435. – P. 1–16.
12. Kaniukov, E.Y. Electrochemically deposited copper nanotubes / E.Y. Kaniukov [et al.] // *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2017. – Vol. 11, no. 1. – P. 270–275.
13. Demyanov, S.E. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide / S.E. Demyanov [et al.] // *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2014. – Vol. 8, no. 4. – P. 805–813.
14. Fei Chan, Y. Ag dendritic nanostructures as ultra-stable substrates for surface-enhanced Raman scattering / Y. Fei Chan [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 102, no. 18. – P. 183118.
15. Ye, W. Controllable growth of silver nanostructures by a simple replacement reaction and their SERS studies / W. Ye [et al.] // *Solid State Sci.* – 2009. – Vol. 11, no. 6. – P. 1088–1093.
16. Qiu, T. Silver fractal networks for surface-enhanced Raman scattering substrates / T. Qiu [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – Vol. 254, no. 17. – P. 5399–5402.
17. Kaniukov, E.Y. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology / E.Y. Kaniukov [et al.] // *Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 27, no. 11. – P. 115305.
18. Kho, K.W. Clinical SERS: are we there yet? / K.W. Kho [et al.] // *J. Biophotonics*. – 2011. – Vol. 4, no. 10. – P. 667–684.

Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Foundation for Basic Research (project number Ф17М-005), a grant of the National Academy of Sciences of Belarus (grant number 2017-26-010), Frame of Baltic Sea Network «NanoPhoto» and the Scientific-technical program «Technology-SG» (project number 3.1.5.1).

References

1. Wei H. and Xu H. Hot spots in different metal nanostructures for plasmon-enhanced Raman spectroscopy. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 207890, pp. 10794–805. doi: 10.1039/c3nr02924g
2. Su K.H., ei Q.-H., Zhang X., Mock J.J., Smith D.R., Schultz S. Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles. *Nano Lett.*, 2003, vol. 3, no. 8, pp. 1087–1090. doi: 10.1021/nl034197f
3. Kim K. and Shin K.S. Surface-Enhanced Raman Scattering: A Powerful Tool for Chemical Identification. *Anal. Sci.*, 2011, vol. 27, no. 8, p. 775.
4. Kneipp K. Surface-enhanced raman scattering. *Phys. Today*, 2007, vol. 60, no. 11, pp. 40–46. doi: 10.1063/1.2812122
5. Santoro G., Yu. S., Shchwartzkopf M., Zhang P., Vayalil S.K., Risch J.F.H., Rubhausen M.A., Hernandez M., Domingo C., Roth S.V. Silver substrates for surface enhanced Raman scattering: Correlation between nanostructure and Raman scattering enhancement. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, no. 24, p. 243107. doi: 10.1063/1.4884423
6. Wang A. and Kong X. Review of Recent Progress of Plasmonic Materials and Nano-Structures for Surface-Enhanced Raman Scattering. *Materials (Basel)*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 3024–3052. doi: 10.3390/ma8063024
7. Xia Y. and Campbell D.J. Plasmons: Why Should We Care? *J. Chem. Educ.*, 2007, vol. 84, no. 1, p. 91. doi: 10.1155/2012/457968
8. Sharma B., Frontiera R.R., Henry A.-I., Ringe E., Van Duyne R.P. SERS: Materials, applications, and the future. *Mater. Today*, 2012, vol. 15, no. 1–2, pp. 16–25. doi: 10.1016/S1369-7021(12)70017-2
9. Khlebtsov N. G. [Optics and biophotonics of nanoparticles with plasmon resonance]. *Quantum Electronics*, 2008, vol. 38, no. 6, pp. 504–529 (in Russian).
10. Kumari G., Kandula J., Narayana C. How Far Can We Probe by SERS? *J. Phys. Chem. C*, 2015, vol. 119, no. 34, pp. 20057–20064. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b07556
11. Kaniukov E., Yakimchuk D., Arzumanyan G., Terryn H., Baert K., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Belonogov E., Demyanov S. Growth mechanisms of spatially separated copper dendrites in pores of a SiO₂ template. *Philos. Mag.*, 2017, vol. 6435, pp. 1–16. doi: 10.1080/14786435.2017.1330562
12. Kaniukov E.Y., Kozlovsky A.L., Shlimas D.I., Zdorovets M.V., Yakimchuk D.V., Shumskaya E.E.,

Kadyrzhanov K.K. Electrochemically deposited copper nanotubes. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 270–275.

doi: 10.1134/S1027451017010281

13. Demyanov S.E., Kaniukov E.Yu., Petrov A.V., Belonogov E.K., Streltsov E.A., Ivanov D.K., Ivanova Yu.A., Trautmann C., Terryn H., Petrova M., Utsarros J., Sivakov V. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide. *J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 805–813.

doi: 10.1134/S1027451014040326

14. Chan Y.F., Zhang C.X., Wu Z.L., Zhao D.M., Wang W., Xu H.J., Sun X.M. Ag dendritic nanostructures as ultrastable substrates for surface-enhanced Raman scattering. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, no. 18, p. 183118.

doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2009.03.001

15. Ye W., Shen C., Tian J., Wang C., Hui C., Gao H. Controllable growth of silver nanostructures by a simple replacement reaction and their SERS studies. *Solid State Sci.*, 2009, vol. 11, no. 6, pp. 1088–1093.

doi: 10.1016/j.apsusc.2008.02.060

16. Qiu T., Wu X.L., Shen J.C., Xia Y., Shen P.N., Chu P.K. Silver fractal networks for surface-enhanced Raman scattering substrates. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, vol. 254, no. 17, pp. 5399–5402. **doi:** 10.1063/1.4803937

17. Kaniukov E.Y., Utsarros J., Yakimchuk D.V., Petrova M., Terryn H., Sivakov V., Petrov A.V. Tunable nanoporous silicon oxide templates by swift heavy ion tracks technology. *Nanotechnology*, 2016, vol. 27, no. 11, p. 115305. **doi:** 10.1088/0957-4484/27/11/115305

18. Kho K.W., Fu C.Y., Dinis U.S., Olivo M. Clinical SERS: are we there yet? *J. Biophotonics*, 2011, vol. 4, no. 10, pp. 667–684. **doi:** 10.1002/jbio.201100047

УДК 621.314.14

Влияние динамического подмагничивания на эффективность электромагнитно-акустического преобразования при волноводном контроле прутков

Злобин Д.В., Волкова Л.В.

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

Поступила 15.05.2017

Принята к печати 20.06.2017

Недостатком электромагнитно-акустического (ЭМА) метода приема ультразвуковых колебаний является его низкая эффективность. Традиционные способы ее повышения – увеличение подмагничивающего поля. Целью данной работы являлось исследование способа повышения эффективности ЭМА преобразования с использованием изменяющегося во времени поля подмагничивания.

Исследования проводились с помощью специально разработанной установки, позволяющей осуществлять подмагничивание постоянным и переменным магнитным полем (динамическое подмагничивание) синхронно с прохождением принятого импульса. Объектом исследования являлись прутки из различных марок стали диаметром 4–6 мм, в которых ЭМА методом возбуждалась симметричная нулевая мода S_0 стержневой волны (в частотном диапазоне около 40 кГц). Проведен сравнительный анализ амплитуд и форм серии импульсов многократных отражений при статическом и динамическом перемагничивании и с полным циклом перемагничивания.

В результате проведенных измерений эффективности ЭМА приема при статическом и динамическом подмагничивании установлено существенное (до 5 раз) увеличение амплитуды сигнала на приемном преобразователе. В связи с тем, что на низких частотах основной вклад в механизм как возбуждения, так и приема вносит магнитоstrictionный эффект, можно предполагать, что использование динамического поля подмагничивания существенным образом влияет на эффективную подвижность магнитных доменов (т.е. изменяет динамическую магнитную восприимчивость материала). Установлена возможность проводить контроль при меньших значениях подмагничивающего поля, а следовательно, снизить массогабаритные размеры магнитной системы.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено наличие и произведена оценка величины эффекта динамического подмагничивания (увеличение амплитуды сигнала принятого ЭМА методом акустического импульса). Использование данного метода позволит повысить качество ЭМА контроля за счет создания более эффективных ЭМА преобразователей. Поскольку величина обнаруженного эффекта существенно зависит от марки стали, можно предположить его возможное применение в методах экспресс-анализа, оценки структурного и напряженного состояний.

Ключевые слова: линейно-протяженные объекты, волноводный контроль, эффективность электромагнитно-акустического преобразования, динамическое подмагничивание, катушка подмагничивания.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

Адрес для переписки:

Волкова Л.В.

Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

Volkova L.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Злобин Д.В., Волкова Л.В.

Влияние динамического подмагничивания на эффективность
электромагнитно-акустического преобразования при волноводном
контроле прутков.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 236–245.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

For citation:

Zlobin D.V., Volkova L.V.

[Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of
Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control
Rods].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 236–245 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control Rods

Zlobin D.V., Volkova L.V.

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

Received 15.05.2017

Accepted for publication 20.06.2017

Abstract

The disadvantage of the electromagnetic-acoustic (EMA) method receiving ultrasonic waves are low efficiency. The traditional way to enhance its effectiveness is increase the bias field. The aim of the study was research the way to improve the efficiency of the EMA transformation, using a time-varying bias field.

The researches held with the help of a specially designed installation that allows the magnetization to be performed by a constant and alternating magnetic field (dynamic bias), synchronously with the passage of the received pulse. The object of the study were rods made of different grades of steel with a diameter of 4–6 mm, in which the symmetrical zero mode S_0 of the rod wave was excited by the EMA method (in the frequency range of about 40 kHz). A comparative analysis of the amplitudes and form pulses of multiple reflections during static and dynamic reversal of magnetization and with a full cycle of magnetization reversal conducted.

The result of the efficiency measurements EMA reception during static and dynamic bias found a significant (up to 5 times) increase in the signal amplitude on the receiving transducer. Taking into account that the main contribution to the excitation mechanism and the reception mechanism made the magnetostrictive effect on low frequency, it can assumed that using a dynamic bias field is impacting significant on the effective mobility of magnetic domains (that is changes the dynamic magnetic susceptibility of the material). It is established that it is possible to monitor steel at lower values of the bias field, and, consequently, to reduce the mass dimensions of the magnetic system.

Thus, in the course of the researchers found of effect of dynamic bias and effect of dynamic bias increase acoustic pulse amplitude of the signal of the received EMA method. Using this method will improve the quality EMA testing by creating more efficient EMA transducer. Taking into account that the value of the detected effect depends significantly on the steel grade, we can assume its possible application in the methods of express analysis, estimation of structural and stressed states.

Keywords: linearly extended objects, the effectiveness of electromagnetic-acoustic conversion, dynamic biasing, the bias coil.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

Адрес для переписки:

Волкова Л.В.
Ижевский государственный технический
университет им. М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Address for correspondence:

Volkova L.V.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: ludmila396@rambler.ru

Для цитирования:

Злобин Д.В., Волкова Л.В.
Влияние динамического подмагничивания на эффективность
электромагнитно-акустического преобразования при волноводном
контроле прутков.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 236–245.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

For citation:

Zlobin D.V., Volkova L.V.
[Influence of Dynamic Magnetization to Improve the Efficiency of
Electromagnetic-Acoustic Transformation with Waveguide Control
Rods].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 236–245 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-236-245

Введение

Большинство методик акустической дефектоскопии и структуроскопии базируется на методах с использованием контактных пьезоэлектрических преобразователей, при этом предъявляются высокие требования к геометрическим размерам, плоскопараллельности поверхности ввода и отражающей поверхности, чистоте обработки поверхности, качеству контакта и др. Недостаточно высокая точность методик, а также необходимость использования эталонных образцов ограничивают их применение.

Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод возбуждения-приема ультразвуковых волн является, безусловно, наиболее перспективной заменой контактных способов [1–3] и обладает рядом преимуществ перед альтернативными бесконтактными способами [4]. Его использование обеспечивает аппаратуре неразрушающего контроля ряд преимуществ: снижение требований к чистоте поверхности объекта контроля (ОК), возможность возбуждать волны различных типов, повышение производительности, контроль в условиях высоких температур и др. [5]. Вместе с тем существенным препятствием внедрению ЭМА метода является его низкая эффективность. Согласно [6–7], значение двойного коэффициента преобразования ЭМА метода не превышает 10^{-4} , что вынуждает применять в аппаратуре ЭМА контроля генераторы и системы подмагничивания повышенной мощности, а также ряд специальных методов, нацеленных на повышение отношения сигнал-шум. К ним относятся, в частности, применение когерентной обработки (суммирование сигнала с последующим его усреднением), возбуждение ЭМА датчика пакетными импульсами тока, сигналами с индивидуальными признаками – частотой заполнения, длительностью, амплитудой, ориентацией вектора поляризации и фазой с последующей корреляционной обработкой, использование узкополосных усилителей [8–10]. Особенно перспективным представляется сочетание ЭМА метода с волноводными способами контроля, так как при этом существенно возрастают производительность, надежность выявления дефектов. Переходу к полностью бесконтактной методике (т.е. к использованию ЭМА датчика и в качестве приемника) препятствует отсутствие достоверных данных об эффективности ЭМА преобразования в различных марках стали.

Одним из способов повышения эффективности ЭМА преобразования является увеличение

величины поля постоянного подмагничивания, в частности с использованием импульсного поляризующего магнитного поля в зоне возбуждения акустических импульсов, повышения амплитуды возбуждающего сигнала и увеличения чувствительности приемного тракта [11–12]. Исследования влияния внешнего постоянного магнитного поля на эффективность ЭМА преобразования и скорости поперечного звука показали, что в области температур фазовых переходов между магнитными структурами наблюдаются интенсивная генерация и аномалии скорости поперечных ультразвуковых волн [13], однако для конструкционных сталей данная зависимость не наблюдается. Целью данной работы было исследование способа повышения эффективности ЭМА преобразования с использованием изменяющегося во времени поля подмагничивания.

Используемые подходы

В волноводной технологии контроля линейно-протяженных объектов, описанной в [14–17], ЭМА преобразователь используется для возбуждения моды S_0 стержневой волны, отражение которой от дефектов фиксируется контактным пьезопреобразователем, установленным на торце ОК. Данная методика реализована в виде акустических дефектоскопов (АДНШ, АДП), внедренных на ряде предприятий нефтедобывающей и машиностроительной областей. Сочетание бесконтактного возбуждения и пьезоприема позволяет получить достаточно высокое значение коэффициента двойного преобразования. Однако использование в качестве приемника контактного пьезодатчика приводит к некоторым ограничениям: зависимости амплитуды сигнала от качества акустического контакта с торцом ОК, необходимости его подготовки и нанесения контактной смазки, достаточно высокой добротности пьезоприемника (увеличивает «мертвую зону» и ухудшает разрешающую способность метода).

В [18–19] показана возможность реализации волноводного контроля в варианте полностью бесконтактной методики ЭМА контроля за счет применения новой схемы формирования зондирующего импульса (двухполярное возбуждение) и специализированных ЭМА преобразователей проходного типа.

Исследования показали, что диапазон амплитуд сигнала при использовании ЭМА приемника может составлять от 0,7 мВ для сталей с низкой эффективностью ЭМАП (А35Г2, 15Х2ГМФ,

АС14, 38ХМА, Сталь 20) до 50–150 мВ для преобразования (12Х18Н10Т, 20Х13, Н29К18, 03Х17Н5ДЗБ) (таблица).

Таблица/Table

Амплитуды эхо-сигналов в различных марках стали при использовании ЭМА и пьезоприемника
Amplitudes of echo signal in different steel grades using an EMA and piezo-receiver

Марка стали Steel grades	$\frac{U_{\text{ЭМА-ЭМА}}}{U_{\text{ЭМА-ЭМА}}}$, мВ mV	$\frac{U_{\text{ЭМА-пьезо}}}{U_{\text{ЭМА-пьезо}}}$, мВ mV	K^2 (ЭМА-ЭМА) K^2 (EMA-EMA)	K^2 (ЭМА-пьезо) K^2 (EMA-piezo)
A35Г2	0,7	150	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
15Х2ГМФ	1,4	680	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
АС14	2,7	200	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
38ХМА	2,7	410	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
20	4,0	380	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
A12	6,0	320	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
35	8,0	200	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
20895	8,0	250	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
P6M5K5	20	300	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
12Х18Н10Т	53	200	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
20Х13	56	800	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
H29K18	58	1500	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
03Х17Н5ДЗБ	150	600	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$

$U_{\text{ЭМА-ЭМА}}$ – напряжение на приемном датчике при использовании ЭМА излучателя и ЭМА приемника

$U_{\text{ЭМА-ЭМА}}$ – the voltage at the receiving sensor when using the EMR emitter and the EMA receiver;

$U_{\text{ЭМА-пьезо}}$ – напряжение на приемном датчике при использовании ЭМА излучателя и пьезоприемника

$U_{\text{ЭМА-пьезо}}$ – voltage on the receiving sensor when using the EMR emitter and the piezo-receiver;

K^2 – коэффициент двойного преобразования, отношение амплитуды зондирующего импульса к принятому сигналу / K^2 – the coefficient of double conversion, the ratio of the amplitude of the probe pulse to the received signal.

Значительный разброс амплитуд сигналов в различных марках стали при идентичных условиях возбуждения и геометрии объекта свидетельствует о магнитострикционном механизме ЭМА преобразования.

Установка для реализации эффекта динамического подмагничивания

Для контроля сталей с низкой эффективностью ЭМА приема необходимы новые технические решения, направленные на увеличение амплитуды сигнала. При проведении измерений зависимости амплитуды ЭМА преобразования от величины поля подмагничивания зафиксировано следующее явление: в случае, если в момент приема поле подмагничивания изменяло свое значение, регистрировалось значительное увеличение сигнала на ЭМА приемнике.

Таким образом, было установлено, что одним из факторов, определяющих величину сигнала на ЭМА приемнике, является скорость изменения внешнего продольного (для линейно-протяженных объектов) подмагничивания.

Для исследования эффекта повышения эффективности ЭМА преобразования в условиях динамического подмагничивания была изготовлена установка, блок-схема которой приведена на рисунке 1.

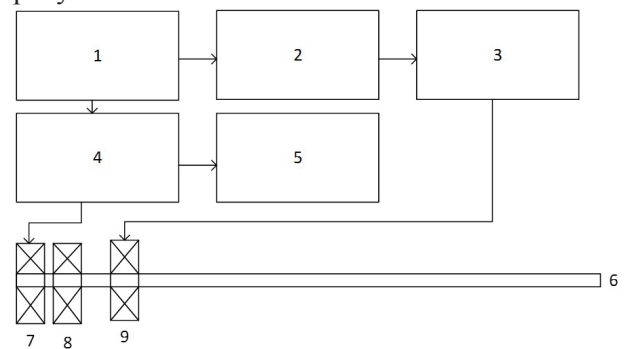


Рисунок 1 – Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор треугольного сигнала; 2 – компаратор; 3 – генератор зондирующего импульса; 4 – усилитель мощности; 5 – осциллограф; 6 – объект контроля; 7 – источник поля подмагничивания; 8 – ЭМА приемник; 9 – ЭМА излучатель

Figure 1 – Block diagram of the experimental device: 1 – triangular signal generator; 2 – comparator; 3 – the probe pulse generator; 4 – power amplifier; 5 – an oscilloscope; 6 – object of control; 7 – source of the bias field; 8 – EMA receiver; 9 – EMA emitter

Выходное напряжение генератора треугольных импульсов 1 поступает на вход усилителя мощности 4, питающего соленоид подмагничивания 7 и одновременно на вход компаратора 2, при срабатывании которого происходит запуск генератора зондирующих импульсов 3. Таким образом, регулировка опорного напряжения компаратора

позволяет изменять абсолютную величину поля подмагничивания, при котором происходит прием сигнала, а изменение коэффициента усиления – скорость изменения поля.

Принципиальные схемы основных блоков установки для реализации эффекта динамического подмагничивания представлены на рисунках 2–4.

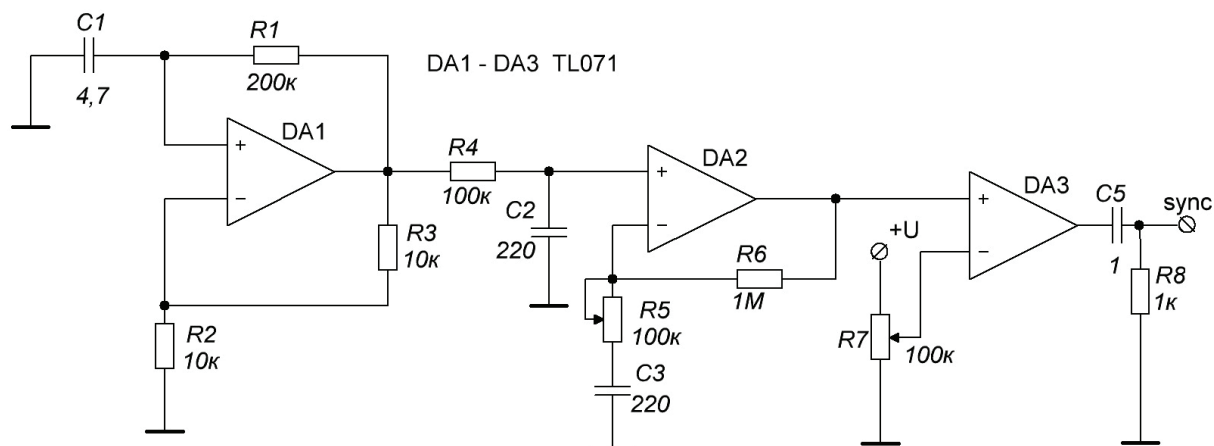


Рисунок 2 – Принципиальная схема задающего генератора установки динамического подмагничивания

Figure 2 – Schematic diagram of the master generator of the dynamic magnetization device

Основой установки является генератор релаксационного типа (рисунок 2), вырабатывающий импульсы прямоугольной формы с частотой порядка 2 Гц. Данные импульсы интегрируются цепью $R4C2$, в результате приобретают форму линейно-нарастающего сигнала (треугольную). Последующий каскад (ОУ DA1.2) обеспечивает требуемое усиление, необходимое для регулировки скорости нарастания напряжения, выход данного каскада подключен ко входу усилителя

мощности, питающего подмагничивающую катушку. Схема сравнения (ОУ DA2.1) имеет регулировку уровня срабатывания и используется для установки момента запуска генератора зондирующих импульсов, синхросигналы для которого формируются дифференцирующей цепью $C4R8$.

Принципиальная электрическая схема генератора зондирующих импульсов приведена на рисунке 3.

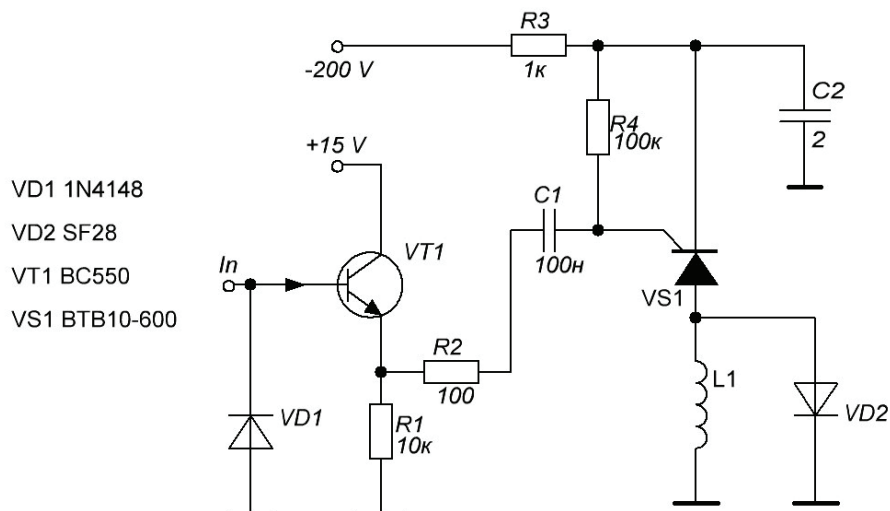


Рисунок 3 – Принципиальная схема генератора зондирующих импульсов

Figure 3 – Schematic diagram of the initial pulse indication generator

Диод $VD1$ предохраняет переход база-эмиттер транзистора $VT1$ от выбросов отрицательного напряжения. $VT1$ обеспечивает необходимый для открытия тиристора $VS1$ ток управляющего электрода. Включение $VS1$ выбрано таким, чтобы в состоянии покоя датчик находился под нуле-

вым потенциалом. Сопротивление $R4$ обеспечивает выравнивание потенциалов анода тиристора и управляющего электрода. Длительность импульса (30–50 мкс) определяется емкостью накопительного конденсатора $C2$ и индуктивностью датчика $L1$. Пиковый ток импульса – порядка 50 А.

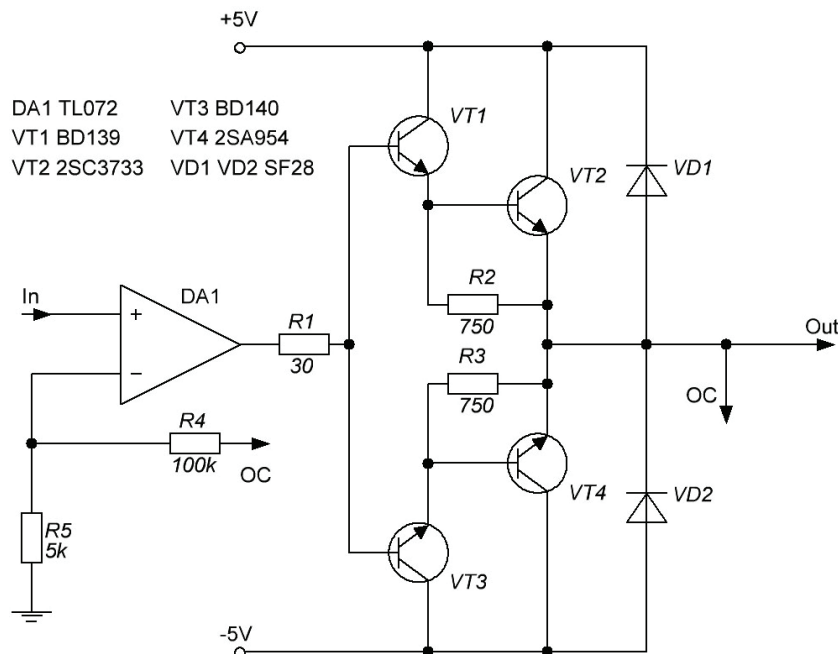


Рисунок 4 – Принципиальная схема усилителя мощности подмагничивающей катушки

Figure 4 – Schematic diagram of the power amplifier of the magnetization coil

Усилитель мощности подмагничивающей катушки (рисунок 4) выполнен по неинвертирующей схеме с использованием ОУ, усиленного двухкаскадным комплементарным эмиттерным повторителем. Так как изменение тока подмагничивания имеет невысокую скорость, переходные искажения эффективно корректируются цепью обратной связи ($R4R5$). $R1$ предотвращает самовозбуждение схемы, резисторы $R2$, $R3$ ускоряют работу составных транзисторов. Диоды $VD1$, $VD2$ предохраняют выход усилителя

от выбросов противо-ЭДС подмагничивающей катушки.

Сравнительная амплитуда и форма серии импульсов многократных отражений при статическом и динамическом подмагничивании и при полном цикле перемагничивания приведены на рисунке 5. Предполагаем, что эффект увеличения эффективности ЭМА приема связан с существенным повышением подвижности доменов в изменяющемся магнитном поле, что приводит к большей степени их переориентации.

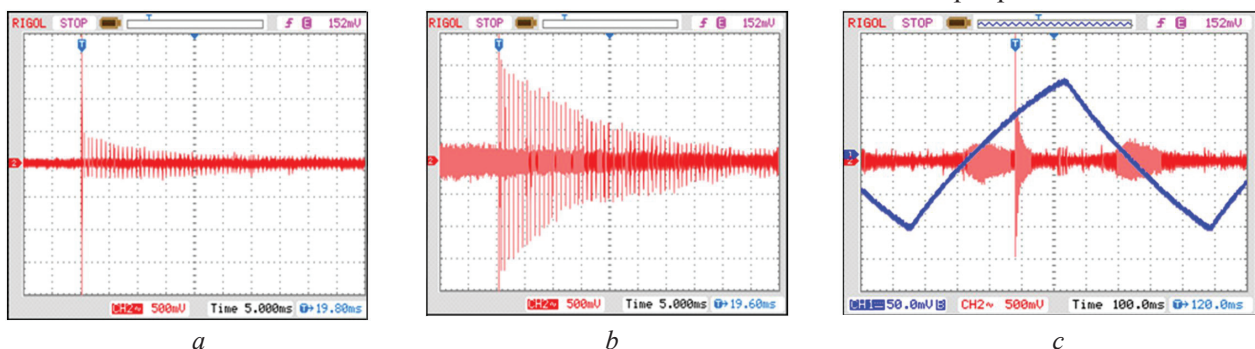


Рисунок 5 – Осциллограммы серии импульсов многократных отражений при статическом (a) и динамическом (b) подмагничивании, полный цикл перемагничивания (c)

Figure 5 – Oscillograms of a series of pulses of multiple reflections for static (a) and dynamic (b) bias, a complete cycle of magnetization reversal (c)

Исследование эффекта динамического подмагничивания

При проведении измерений зависимости амплитуды сигнала ЭМА преобразователя от величины поля подмагничивания было зафиксировано, что в случае изменения в момент приема значения поля подмагничивания (динамическое подмагничивание) регистрируется

значительное увеличение сигнала на ЭМА приемнике.

Для сравнения со статическим режимом подмагничивания с помощью источника постоянного напряжения в образце создавалось статическое магнитное поле той же величины. На рисунке 6 приведены графики зависимостей амплитуды ЭМА преобразования от напряженности поля подмагничивания для различных марок сталей.

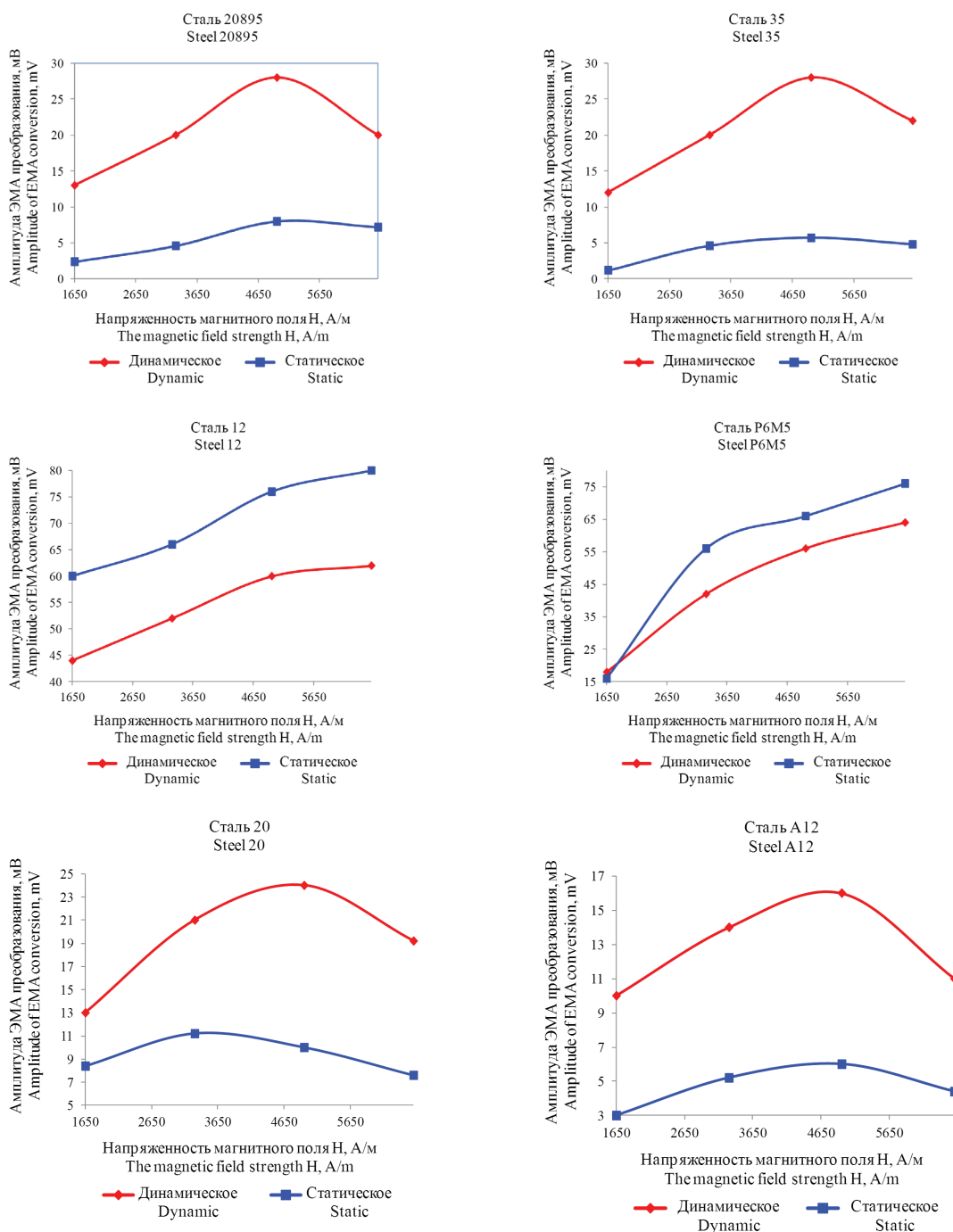


Рисунок 6 – Зависимость амплитуды электромагнитно-акустического преобразования от напряженности поля подмагничивания для образцов различных марок стали

Figure 6 – Dependence of the amplitude of the EMA conversion on the bias field magnetization

Измерения производились при напряженности магнитного поля от 1650 до 6000 А/м при этом измерения в статическом режиме проводились при той же напряженности поля, на которую был настроен компаратор в режиме динамического подмагничивания.

Измерения производились при скорости изменения напряженности поля $6 \cdot 10^4$ А·с/м. Выбор данного значения обусловлен тем, что величина амплитуды сигнала практически линейно растет с увеличением скорости изменения напряженности поля, однако проведение измерений при больших значениях скорости затруднительно вследствие того, что длительность серии эхо-импульсов становится сопоставимой со временем цикла перемагничивания прутка, что приводит к модуляции амплитуды принятого сигнала.

Результаты исследования показали, что для большинства образцов применение динамического подмагничивания позволяет получить существенное (до 5 раз) увеличение амплитуды сигнала на приемном ЭМА преобразователе. Таким образом, появляется возможность проводить контроль при меньших значениях подмагничивающего поля, а следовательно, снизить массогабаритные размеры магнитной системы.

Заключение

Достоверно установлено и количественно оценено увеличение амплитуды сигнала ЭМА приемника при динамическом подмагничивании. Применение разработанного метода делает возможным создание конструкций ЭМА приемников, обладающих высокой эффективностью приема при небольших значениях поля подмагничивания (динамического).

Полученные результаты могут способствовать разработке аппаратуры контроля линейно-протяженных объектов, использующей полностью бесконтактную методику возбуждения приема стержневой волны, обладающей при этом достаточно высокой чувствительностью, сопоставимой с применением контактного приемного преобразователя.

Установление механизмов, приводящих к столь значительному изменению амплитуды ЭМА преобразования при использовании динамического подмагничивания в контролируемом объекте, требует дальнейших исследований. Можно предположить, что эффект увеличения эффективности ЭМА приема связан с повышени-

ем подвижности доменов в изменяющемся магнитном поле, что приводит к большей степени их переориентации. Однако, возможной причиной фиксируемых в эксперименте результатов может быть наличие вихревых токов, возникающих в ОК при динамическом подмагничивании, приводящих к увеличению суммарного магнитного потока в объекте. Существенный интерес могут представлять исследования влияния переменного поля подмагничивания при стандартных ЭМА методиках возбуждения УЗ колебаний в объектах (использование плоского ЭМА преобразователя и накладной магнитной системы). Получение положительных результатов может способствовать разработке значительно более компактных и энергоэффективных, по сравнению с используемыми в настоящее время, преобразователей. Кроме того, наличие зависимостей амплитуды сигнала от величины и скорости изменения магнитного поля может быть использовано для получения дополнительных информативных параметров, например, для идентификации марок сталей.

Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 (2015-2017) Российского научного фонда.

Список использованных источников

1. Баев, А.Р. Особенности обнаружения поверхностных дефектов с помощью импульсно-лазерного возбуждения упругих волн / А.Р. Баев, А.И. Митьковец, Д.А. Костюк, Г.Е. Коновалов // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 286–295.
2. Баев, А.Р. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом / А.Р. Баев, М.В. Асадчая, О.С. Сергеева, Г.Е. Коновалов // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 121–128.
3. Takashi, Takishita. Development of shear-vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer / Takishita Takashi, Ashida Kazuhiro, Nakamura Nobutomo, Ogi Hirotsugu, Hirao Masahiko // Japanese Journal of Applied Physics. – Vol. 54. – Number 7S1.
4. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1. – С. 72–78.
5. Matthias, Sehera. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) / Matthias Sehera, Peter B. Nagy // NDT & E International. – 2016. – Vol. 84. – P. 1–10.
6. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль:

справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

7. Budenkov, G.A. Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation / G.A. Budenkov, O.V. Korobeinikova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45. – Is. 4. – P. 252–258.

8. Сучков, Г.В. Современные возможности ЭМА дефектоскопии / Г.В. Сучков // Дефектоскопия. – 2005. – № 12. – С. 24–39.

9. Муравьева, О.В. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О.В. Муравьева [и др.] // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

10. Bing, Li. Application of electromagnetic acoustic in steel pipe inspection // Control Conference (CCC). – 2016. – 35th Chinese.

11. Dixon, S. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers / S. Dixon, C. Edwards, S.B. Palmer // Ultrasonics. – 2001. – Vol. 39. – Is. 6. – P. 445–453.

12. Mikhailov, A.V. An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing / A.V. Mikhailov, Yu.L. Gobov, Ya.G. Smorodinskii, S.V. Shcherbinin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51. – Is. 8. – P. 467–475.

13. Buchel'nikov, V.D. Electromagnetic-acoustic transformation in an erbium single crystal / V.D. Buchel'nikov, I.V. Bychkov, Yu.A. Nikishin, S.B. Palmer, C.M. Lim, C. Edwards // Physics of the Solid State. – 2002. – Vol. 44. – No. 11. – P. 2116–2123.

14. Murav'eva, O.V. The effect of regular differences in a cross section on the testability of a rod tested by the acoustic waveguide method / O.V. Murav'eva, V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – Is. 4. – P. 219–226.

15. Муравьева, О.В. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, В.А. Стрижак, Е.Н. Кокорина, М.А. Лойферман // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1. – С. 52–60.

16. Murav'ev, V.V. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, V.A. Strizhak, A.V. Pryakhin, E.N. Fokeeva // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – Is. 8. – P. 435–442.

17. Муравьев, В.В. Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60C2A при производстве пружин с наноразмерной структурой / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, Е.Н. Кокорина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – Вып. 4. – С. 66–70.

18. Злобин, Д.В. Особенности построения аппара-

туры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д.В. Злобин, О.В. Муравьева // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 99–104.

19. Muravyev, V.V. Quality control of heat treatment of 60C2A steel bars using the electromagnetic-acoustic method / V.V. Muravyev, O.V. Muravyeva, E.N. Kokorina // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49. – Is. 1. – P. 15–25.

This work was supported by the Russian Science Foundation (№ 15-19-00051 (2015–2017)).

References

1. 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]. *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

2. Baev A.R., Asadchaya M.V., Sergeeva O.S., Kononov G.E. [Propagation of rayleigh wave in solids with fillet transitions]. *Devices and Methods of Measurements*, 2011, no. 2, pp. 127–128 (in Russian).

3. Takishita Takashi, Ashida Kazuhiro, Nakamura Nobutomo, Ogi Hirotsugu, Hirao Masahiko Development of shear-vertical-wave point-focusing electromagnetic acoustic transducer. *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 7S1

(<https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HC04>).

4. Stepanenko D.A., Bogdanchuk K.A., Minchenya V.T. [Measurement of spatial distribution of mechanical stresses in ultrasonic waveguide systems by means of sensors based on Villari effect]. *Devices and methods of measurements*, 2013, no. 1, pp. 72–78 (in Russian).

5. Matthias Sehera, Peter B. Nagy. On the separation of Lorentz and magnetization forces in the transduction mechanism of Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). *NDT & E International*, 2016, vol. 84, pp. 1–10 (<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2016.07.001>).

6. Ermolov I.N., Lange Yu.V., ed. Klyuev V.V. *Nerazrushayushchii kontrol'* [Nondestructive testing]: Handbook in 7 vol. Under general. Vol. 3: Ultrasonic testing, Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2004, 864 p.

7. Budenkov G.A., Korobeinikova O.V. Influence of the chemical composition and temperature of metals on the efficiency of electromagnetic-acoustic transformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, is. 4, pp. 252–258. doi: 10.1134/S1061830909040056

8. Suchkov G.M. State-of-the-art capabilities of EMA flaw detection. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2005, vol. 41, is. 12, pp. 790–801. doi: 10.1007/s11181-006-0035-2

9. Muraveva O.V., Muravyov V.V., Kokorina E.N., Sterkhov V.D., Malyutin D.V. [Optimization of bias mag-

netization systems for electromagnetically-acoustic bulk transducers for non-destructive control of bar rolling]. *Datchiki i sistemi* [Sensors and systems], 2013, no. 2, pp. 2–9 (in Russian).

10. Bing Li. Application of electromagnetic acoustic in steel pipe inspection. *Control Conference (CCC)*, 2016, 35th Chinese (10.1109/ChiCC.2016.7554872).

11. Dixon S., Edwards C., Palmer S.B. High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers. *Ultrasonics*, 2001, vol. 39, is. 6, pp. 445–453.

12. Mikhailov A.V., Gobov Yu.L., Smorodinskii Ya.G., Shcherbinin S.V. An electromagnetic-acoustic transducer with pulsed biasing. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 2015, vol. 51, is. 8, pp. 467–475.

13. Buchel'nikov V.D., Bychkov I.V., Nikishin Yu.A., Palmer S.B., Lim C.M., Edwards C. Electromagnetic-acoustic transformation in an erbium single crystal. *Physics of the Solid State*, 2002, vol. 44, no. 11, pp. 2116–2123.

14. Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V. The effect of regular differences in a cross section on the testability of a rod tested by the acoustic waveguide method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, is. 4, pp. 219–226. doi: 10.1134/S1061830914040068

15. Muravjeva O.V., Muravjev V.V., Strizhak V.A.,

Kokorina E.N., Loyferman M.A. [Spring Manufacturing. Real Sensitivity of Bar Workpiece Incoming Acoustic Inspection]. *In the world of nondestructive testing*, 2013, no. 1, pp. 52–60 (in Russian).

16. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Fokeeva E.N. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, is. 8, pp. 435–442.

doi: 10.1134/S1061830914080063

17. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Kokorina E.N. [Acoustic Structuroscopy and Flaw Detection of Rods of 60C2A Steel in the Production of Springs with a Nanoscale Structure]. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous metallurgy]. 2013, is. 4, pp. 66–70 (in Russian).

18. Zlobin D.V., Muraveva O.V. [Features of the construction of equipment for electromagnetic-acoustic flaw detection of bar stock using rod waves]. *Bulletin of the Izhevsk State Technical University* [Vestnik Izhevsk State Technical University]. 2012, no. 4, pp. 99–104 (in Russian).

19. Muravyev V.V., Muravyeva O. V., Kokorina E.N. Quality control of heat treatment of 60C2A steel bars using the electromagnetic-acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, is. 1, pp. 15–25.

УДК 53.089.68

Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.

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

Поступила 21.03.2017

Принята к печати 27.06.2017

Приборы на основе сцинтилляционных детекторов обладают высокой чувствительностью к фотонному излучению и широко применяются для измерения мощности дозы гамма-излучения окружающей среды. Модернизация измерительного тракта для минимизации погрешности измерения отклика детектора на гамма-излучение уже достигла своего технологического потолка и не дает должного эффекта. Более перспективными для этой цели являются методы обработки получаемой спектрометрической информации. Целью данной работы являлась разработка высокочувствительных образцовых средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с применением спектрометрического метода расчета мощности дозы.

В данной работе рассматривается спектрометрический метод дозиметрии гамма-излучения на основе преобразования измеренного аппаратного спектра. С использованием заранее рассчитанных или измеренных функций отклика детектора на воздействие гамма-излучения заданной энергии и плотности потока определяется некоторая функция от энергии $G(E)$. Используя эту функцию в качестве ядра интегрального преобразования от характеристики поля к дозе, можно получить величину дозы непосредственно из текущего аппаратного спектра. Применяя функцию $G(E)$ к энергетическому распределению флюенса фотонного излучения в окружающей среде, общая мощность дозы может быть определена без информации о распределении радиоизотопов в окружающей среде.

Для определения $G(E)$ методом Монте-Карло рассчитываются аппаратные функции отклика сцинтилляционного детектора на излучение моноэнергетических фотонных источников, а также другие характеристики. Далее весь энергетический диапазон регистрации разбивается на энергетические интервалы, для которых вычисляется функция $G(E)$ с применением линейной интерполяции.

Рассматриваемый спектрометрический метод расчета дозы с применением функции $G(E)$ позволяет использовать сцинтилляционные блоки детектирования для решения широкого круга дозиметрических задач. В статье приведен способ вычисления данной функции с помощью методов Монте-Карло и описываются особенности ее применения. Представлены результаты расчета функции $G(E)$ для блока детектирования с NaI(Tl) детектором (Ø40 мм, $h = 40$ мм) и результаты его использования в качестве блока-компаратора для аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности кермы в воздухе.

Ключевые слова: сцинтилляционный детектор, оператор преобразования «спектр-доза», метод Монте-Карло, компаратор.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Адрес для переписки:

Лукашевич Р.В.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: rimlianin@gmail.com

Address for correspondence:

Lukashevich R.
SPE «ATOMTEH»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: rimlianin@gmail.com

Для цитирования:

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.
Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 3. С. 246–253.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

For citation:

Lukashevich R., Fokov G.
[Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units].
Devices and Methods of Measurements. 2017, vol. 8, no. 3, pp. 246–253 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units

Lukashevich R., Fokov G.

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

Received 21.03.2017

Accepted for publication 27.06.2017

Abstract

Devices based on scintillation detector are highly sensitive to photon radiation and are widely used to measure the environment dose rate. Modernization of the measuring path to minimize the error in measuring the response of the detector to gamma radiation has already reached its technological ceiling and does not give the proper effect. More promising for this purpose are new methods of processing the obtained spectrometric information. The purpose of this work is the development of highly sensitive instruments based on scintillation detection units using a spectrometric method for calculating dose rate.

In this paper we consider the spectrometric method of dosimetry of gamma radiation based on the transformation of the measured instrumental spectrum. Using predetermined or measured functions of the detector response to the action of gamma radiation of a given energy and flux density, a certain function of the energy $G(E)$ is determined. Using this function as the core of the integral transformation from the field to dose characteristic, it is possible to obtain the dose value directly from the current instrumentation spectrum. Applying the function $G(E)$ to the energy distribution of the fluence of photon radiation in the environment, the total dose rate can be determined without information on the distribution of radioisotopes in the environment.

To determine $G(E)$ by Monte-Carlo method instrumental response function of the scintillator detector to monoenergetic photon radiation sources as well as other characteristics are calculated. Then the whole full-scale energy range is divided into energy ranges for which the function $G(E)$ is calculated using a linear interpolation.

Spectrometric method for dose calculation using the function $G(E)$, which allows the use of scintillation detection units for a wide range of dosimetry applications is considered in the article. As well as describes the method of calculating this function by using Monte-Carlo methods and the features of its application. The results of the calculation function $G(E)$ for the detection unit on the basis of NaI(Tl) detector ($\varnothing 40$ mm, $h = 40$ mm) to use it as a comparator for kerma rate in the air certification of low intense photon radiation fields.

Keywords: scintillation detector, spectrum-dose conversion operator, the Monte-Carlo method, comparator.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Адрес для переписки:

Лукашевич Р.В.
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: rimlianin@gmail.com

Address for correspondence:

Lukashevich R.
SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: rimlianin@gmail.com

Для цитирования:

Лукашевич Р.В., Фоков Г.А.
Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 246–253.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

For citation:

Lukashevich R., Fokov G.
[Application of the Spectrometric Method for Calculating the Dose Rate for Creating Calibration Highly Sensitive Instruments Based on Scintillation Detection Units].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 246–253 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

Введение

Приборы на основе сцинтилляционных детекторов обладают высокой чувствительностью к фотонному излучению и широко применяются для измерения мощности дозы окружающей среды. Поскольку они имеют большую плотность, чем ионизационные камеры, небольшие сцинтилляционные детекторы имеют сопоставимую чувствительность с ионизационными камерами больших размеров, что позволяет создавать портативные высокочувствительные приборы. Часто сцинтилляционные приборы используются в спектрометрии для идентификации отдельных радионуклидов и оценки их вклада в суммарную мощность дозы. Однако из-за сложной формы и сильной энергетической зависимости функции отклика сцинтилляционных детекторов, достижение приемлемой точности в дозиметрах на их основе является трудной задачей.

Возможности улучшения детекторной части измерительного тракта с целью уменьшения погрешности измерения отклика детектора на гамма-излучение ограничены. Поэтому для достижения этой цели был выбран путь модернизации методов обработки получаемой спектрометрической информации.

В Японии в 1960–1970-х гг. были разработаны несколько методов оценки дозы по амплитуде импульсов аппаратурного спектра сцинтилляционных детекторов. Один из них вводит некоторую функцию $G(E)$, с помощью которой можно получить величину дозы непосредственно из аппаратурного спектра, используя эту функцию в качестве ядра интегрального преобразования от характеристики поля к дозе [1, 2, 3]. Преимущество метода состоит в возможности измерения малых уровней гамма-излучения благодаря высокой чувствительности применяемых сцинтилляционных детекторов [4]. Данный метод используется в радиационном приборостроении, но его применение в основном ограничивается созданием средств измерения с погрешностью 15–25 % [5–7]. При этом возможности метода намного шире и позволяют создавать, например, образцовые высокочувствительные средства измерения для аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности дозы.

Например, поверка и калибровка дозиметрических установок фотонного излучения по мощности кермы в воздухе проводится с использованием эталонных полостных ионизационных камер объемом до 10 л, нижняя граница измере-

ний которых соответствует дозе порядка нескольких мкГр/ч. Для высокочувствительных дозиметров радиационной защиты часто требуется проводить калибровку в диапазоне мощности кермы в воздухе до 0,1 мкГр/ч. Поэтому целью данной работы являлась разработка блока-компаратора на основе сцинтилляционного блока детектирования с возможностью поверки образцовых и рабочих средств измерений, калибровки полей фотонного излучения низкой интенсивности по мощности кермы в воздухе.

Функция $G(E)$

При применении функции $G(E)$ к энергетическому распределению флюенса фотонного излучения в окружающей среде в качестве функционала общая мощность дозы может быть определена без информации о распределении радиоизотопов в окружающей среде. Суммарная мощность дозы излучения, вызванная фотонным излучением, может быть получена без сведений о спектральном распределении радиоизотопов, если энергетическое распределение флюенса фотонного излучения получено в месте расположения детектора. На основе этой идеи в работе [1] разработана методика преобразования аппаратурного спектра сцинтилляционных детекторов путем воздействия на него функционала «спектр-доза», который задается функцией $G(E)$. Это позволило получать суммарную мощность дозы излучения непосредственно по детектируемому аппаратурному спектру внешнего фотонного излучения.

Поскольку только моделированием спектра вычислить функцию $G(E)$ нельзя, необходимо найти способ вычисления, использующий распределение амплитуды импульсов, фактически наблюдаемое в детекторе. В качестве распределения спектра сравнения сцинтилляционного детектора, применяющегося в вычислении функции $G(E)$, используется спектр энергетических потерь для параллельного пучка фотонного излучения, определенный теоретически с помощью метода Монте-Карло [8, 9]. Для определения функции $G(E)$ методом Монте-Карло рассчитываются аппаратурные функции отклика сцинтилляционного NaI(Tl) детектора на излучение моноэнергетических фотонных источников, а также другие характеристики.

Используя эти результаты, можно рассчитать функцию $G(E)$, однако нельзя надеяться на вычисление точных ее значений, поскольку между фактическим и теоретически рассчитанным распределением имеется расхождение. Поэтому, как

правило, энергетическое распределение находится путем интерполяции полученных экспериментальных и теоретических спектральных распределений.

Источниками ошибок в данном методе являются:

- отклонение действительного распределения амплитуды импульса от предполагаемого прямоугольного распределения;
- зависимость функции $G(E)$ от расстояния между источником и детектором;
- угловая характеристика чувствительности сцинтилляционного детектора, которая важна, в частности, при измерении излучения окружающей среды.

Кроме того, возникают ошибки, получающиеся при энергетической калибровке шкалы прибора и из-за изменений усиления измерительного тракта во время измерений. Но при этом метод позволяет эффективно избегать неопределенностей, имеющих место при классической обработке спектров матричным методом.

Моделирование детектора и расчет функции $G(E)$

В нашей работе для определения функции $G(E)$ методом Монте-Карло использовался программный комплекс *SNEGMONT* [10]. А именно рассчитывались аппаратные функции отклика используемого сцинтилляционного блока детектирования. В режиме расчета аппаратных функций отклика при моделировании накапливается спектр энергии, поглощенной детектирующим элементом, т.е. для каждого энергетического канала подсчитывается количество соответствующих импульсов. По завершении монтекарловской части программы аппаратные функции отклика разыгрываются по Гауссу на основе рассчитанных энергетических спектров и экспериментально определенной зависимости энергетического разрешения от энергии.

При расчете функций отклика учет конфигурации и эффективности регистрации NaI(Tl) детектора, используемых в расчетах, является очень важным, поскольку существенно влияют на спектральную форму аппаратного спектра.

Расчетная геометрическая модель детектора включает в себя NaI(Tl) кристалл с окружающими его внешними оболочками, а также элементы внешних конструкций блока детектирования и окружающей среды. В данной работе рассматривается сцинтилляционный блок детектирования

на основе NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм). NaI(Tl) детектор, обладающий высокой чувствительностью к фотонному излучению и низким собственным фоном, имеет ряд преимуществ при использовании функции $G(E)$, а именно:

- отсутствие энергетической зависимости при оценке дозы облучения фотонного излучения;
- определение дозы облучения без спектрального анализа и оценки дифференциальной дозы облучения, включая дозу облучения рассеянного излучения со спектральным анализом;
- непродолжительность времени измерения и простота процесса измерения по сравнению с ионизационной камерой.

С помощью программного комплекса *SNEGMONT* были рассчитаны аппаратные функции отклика NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) на потоки моноэнергетических фотонов с энергией от 10 до 3000 кэВ (рисунок 1). Предполагалось, что на входное окно детектора падает по нормали равномерный параллельный поток моноэнергетических фотонов с заданной мощностью амбиентного эквивалента дозы у поверхности детектора. Соответствующая плотность потока вычисляется программой в процессе задания пользователем исходных данных моделирования. Моделируемое время воздействия определялось по критерию заданной статистической достоверности результатов.

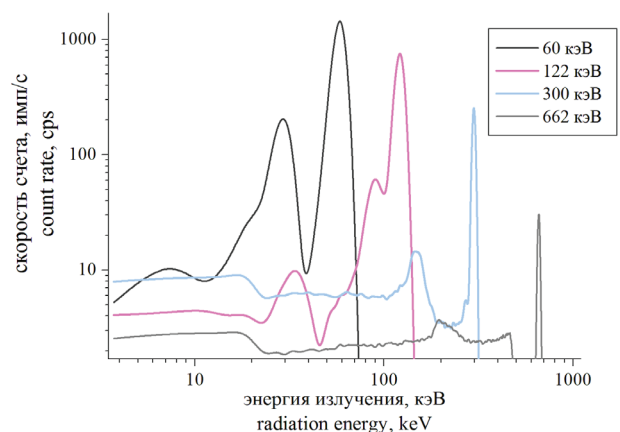


Рисунок 1 – Аппаратурные функции отклика NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) на моноэнергетическое гамма-излучение, рассчитанные по методу Монте-Карло

Figure 1 – Instrument response functions of the NaI(Tl) detector ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) to monoenergetic gamma radiation calculated by Monte-Carlo method

На основе смоделированных функций отклика для нескольких десятков различных исходных монолиний гамма-излучений были рассчитаны эффективность регистрации и чувствительность детектора.

Полученные аппаратурные функции отклика на моноэнергетическое излучение в диапазоне энергий от 10 до 3000 кэВ представляют собой спектральное распределение, соответствующее параллельному пучку фотонного излучения.

Аппаратурное спектральное распределение фотонного излучения в кристалле NaI(Tl) в области энергий менее 2 МэВ, где влияние образования электронных пар невелико, образуется из распределения вторичных электронов с энергиями от нуля до комптоновского порога, пика полного поглощения, созданного главным образом фотоэлектрическим поглощением, а также низкоэнергетической составляющей, обусловленной рассеянием.

Наблюдаемое в действительности амплитудное распределение импульсов, ширина которых увеличивается как при прохождении сцинтилляционных фотонов от места генерации до входного окна фотоэлектронного умножителя, так и при усилении тока электронов, образованных в результате фотоэффекта, представляет собой непрерывный спектр. Далее весь энергетический диапазон регистрации разбивается на энергетические интервалы, для каждого из которых вычисляется функция $G(E)$ с применением линейной интерполяции.

Расчеты функции $G(E)$ удобно производить в среде MathCAD с использованием интеллектуального алгоритма, позволяющего подбирать энергетические интервалы и минимизировать отклонения функции $G(E)$. На рисунке 2 представлены примеры аппаратурного спектра и спектр дозы, создаваемые коллимированным источником гамма-излучения ^{226}Ra в составе дозиметрической установки.

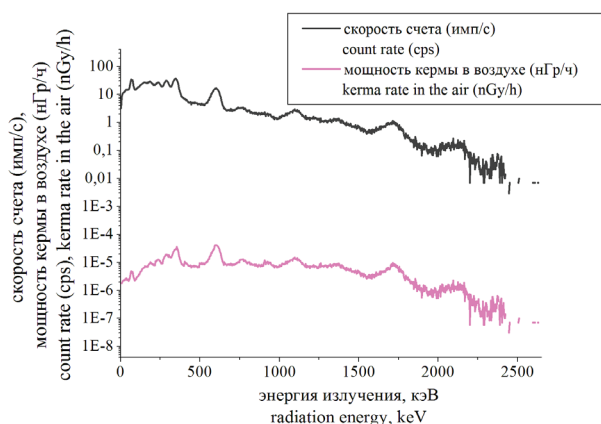


Рисунок 2 – Измеренный аппаратурный и рассчитанный дозовый спектры источника гамма-излучения ^{226}Ra
Figure 2 – Measured instrumental and calculated dose spectra of the gamma radiation source ^{226}Ra

Отметим, что точность измерения мощности дозы, основанного на использовании функции $G(E)$, зависит от ширины канала энергетической шкалы спектрального распределения. Для создания образцовых средств измерения важно учитывать данный момент, так как он может вносить существенную погрешность в величину измеренной мощности дозы. Для решения этой задачи разработан алгоритм расчета функции $G(E)$, учитывающий реальную ширину энергетического канала используемых блоков детектирования. Применение данного подхода позволило добиться хорошей сходимости результатов расчета мощности дозы с помощью функции $G(E)$ и измеренных значений мощности дозы на поверочных дозиметрических установках.

Направленность детектора при использовании функции $G(E)$

Для решения задач по измерению мощности дозы окружающей среды необходимо учитывать положение сцинтилляционного детектора при проведении измерений. В отличие от ионизационных камер, сцинтилляционные блоки детектирования имеют выраженную характеристику направленности. Поэтому расчет функции $G(E)$ и калибровка должны выполняться для рабочей геометрии измерений прибора.

С помощью программного комплекса SNEGMONT обнаружено, что сцинтилляционные детекторы с отношением диаметра к высоте 4:3 имеют самую лучшую характеристику направленности. При этом в сцинтилляционных детекторах, у которых диаметр в 1,5 раза больше высоты, самая высокая чувствительность (прирост составляет +3 %) наблюдается при углах падения излучения в пределах 15° и далее, приближаясь к 90° , снижение чувствительности достигает –6 %.

В наших исследованиях применялся сцинтилляционный детектор с равными по размеру диаметром и высотой. В этом случае по мере увеличения угла падения гамма-излучения чувствительность детектора растет и становится максимальной при углах $70\text{--}80^\circ$ (прирост чувствительности составляет +10 % относительно рабочей торцевой геометрии измерения).

Разработка блока-компаратора

Полученные значения функции $G(E)$ использовались при отладке блока детектирования на основе NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм). На

его основе был создан блок-компаратор для аттестации полей фотонного излучения по мощности кермы в воздухе.

Апробация блока детектирования с функцией $G(E)$ в качестве средства измерения проведена на поверочной дозиметрической установке УДГ-АТ110 [11] с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs и ^{60}Co . Сравнительный анализ полученных экспериментальных и расчетных аппаратных спектров показал хорошую сходимость. Поэтому значения мощности дозы, полученные с использованием функции $G(E)$, хорошо согласуются с действительными значениями мощности дозы (отклонения менее 3 %) в исследуемых полях излучения. В результате проведенных измерений определены основные метрологические характеристики блока-компаратора.

Для подтверждения метрологических характеристик блока-компаратора были проведены исследования, а позже выполнена калибровка в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» на государственных эталонах Российской Федерации по мощности кермы в воздухе: эталонной установке рентгеновского излучения УЭД 50-320 из состава ГЭТ 8-2011, эталонной установке гамма-излучения УИЭЗ с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{60}Co из состава ГВЭТ 8-2.

Зависимость показаний блока-компаратора от мощности кермы в воздухе была исследована в полях гамма-излучения радионуклидных источников из ^{137}Cs (662 кэВ) в диапазоне от 0,03 до 50 нГр/с. Результаты исследований показали отклонение от линейности в пределах $\pm 3\%$ в указанных диапазонах мощностей кермы в воздухе (рисунок 3).

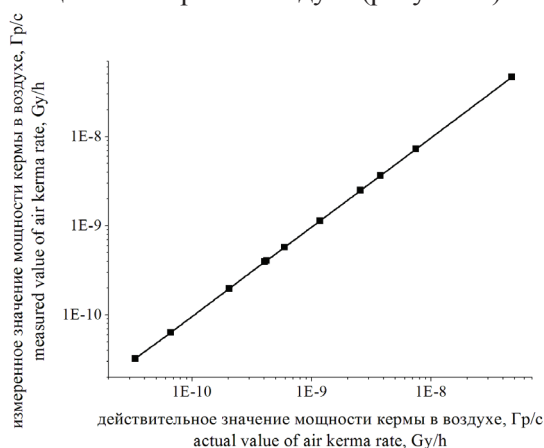


Рисунок 3 – Зависимость показаний блока-компаратора от мощности кермы в воздухе в полях гамма-излучения радионуклидного источника ^{137}Cs (662 кэВ)

Figure 3 – Dependence comparator readings of kerma rate in the air in the fields of gamma radiation of ^{137}Cs radionuclide source (662 keV)

Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора была исследована в диапазоне средних энергий фотонов от 40 до 1250 кэВ с использованием рентгеновского и гамма-излучений. Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора в данном диапазоне энергий не превышает $\pm 6\%$ (рисунок 4).

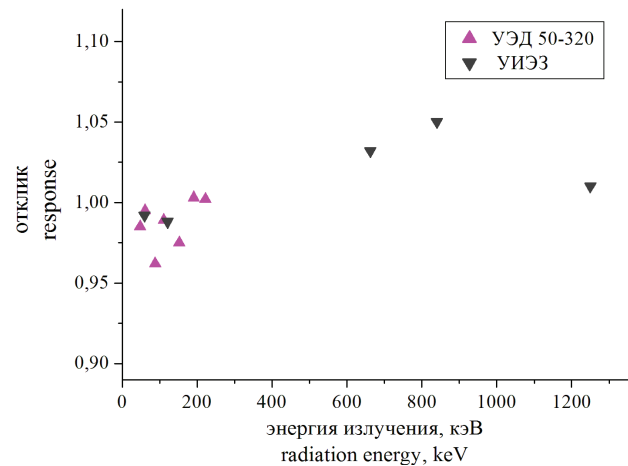


Рисунок 4 – Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора в диапазоне энергий фотонов от 40 до 1250 кэВ

Figure 4 – The energy dependence of the sensitivity of the comparator in the photon energy range from 40 to 1250 keV

В ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» выполнена калибровка блока-компаратора, принадлежащего УП «АТОМТЕХ», с выдачей сертификата калибровки. Максимальное значение расширенной неопределенности полученных значений калибровочных коэффициентов, при коэффициенте охвата $k = 2$, блока-компаратора не превышает 4 %.

В настоящее время несколько подобных блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения поставлены и успешно используются в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева» и в УП «АТОМТЕХ».

Заключение

Применение программного комплекса *SNEGMONT* и учет ширины энергетического канала используемых блоков детектирования при расчете функции $G(E)$ обеспечивают хорошую воспроизводимость и достоверность измеряемой мощности дозы. Представленные результаты измерений распределений амплитуд импульсов, полученных методом Монте-Карло с использованием программного комплекса

SNEGMONT, обеспечивают отклонение потока фотонов менее чем в 1 % от истинного входного потока фотонов.

Метод оценки мощности дозы по энергии фотонов в спектре с использованием функции $G(E)$ является более гибким, чем применяемые в настоящее время методы, и обеспечивает надежные результаты, совпадающие с современной концепцией радиационного контроля, так как при измерении дозы присутствует аппаратный спектр излучения и доступна информация об энергии излучения.

Результаты определения метрологических характеристик и калибровка в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева», созданного на базе сцинтилляционного детектора блока-компаратора, показывают, что применение описанного выше подхода позволяет использовать рассматриваемый блок-компаратор в метрологии фотонного излучения для поверки рабочих эталонов и средств измерений, калибровки полей фотонного излучения низкой интенсивности по мощности кермы в воздухе в интервале энергий фотонов от 40 до 1500 кэВ с погрешностью не более 4–6 %.

Список использованных источников

1. Moriuchi, S. A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator / S. Moriuchi // *JAERI 1209* (Japan Atomic Energy Research Institute). – 1970.
2. Moriuchi, S. Determination of spectrum-dose conversion operator for spherical NaI(Tl) scintillators / S. Moriuchi, T. Nagaoka, S. Sakamoto, K. Saito // *JAERI-M 8092* (Japan Atomic Energy Research Institute). – 1972.
3. Moriuchi, S. Development of a dosimetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation / S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito // *Proc. 10-th IRPA International Congress*. – May 2000. – P-3b-197.
4. Фоминых, В.И. Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» / В.И. Фоминых, Г.И. Шульгович, В.А. Кожемякин // *Метрология*. – № 10. – 1983. – С. 32–39.
5. Aoyama, K. Development of low-energy x-ray survey-meter, radiation detectors and their uses / K. Aoyama, K. Masui, S. Yamamura, T. Nakamura, T. Yabutani, Y. Namito // *KEK Proceedings*. – 2006. – 7 November. – P. 57–67.
6. Yamamura, S. Development of wide-energy range X/gamma-ray survey-meter / Seini Yamamura, Takashi Nakamura, Katsuhito Itou, Osamu Hatakeyama, Kaoru Masui // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2008. – No. 45, iss. 5. – P. 187–190.

7. Бабенко, В.В. Спектрометрический метод измерения поглощенной дозы гамма-излучения с помощью NaI(Tl) детектора / В.В. Бабенко, А.Г. Исаев [и др.] // *Сборник материалов XI ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ»*. – Обнинск : ФГОУ «ГЦИПК», 2005. – С. 67–77.

8. Cho, G. Electronic dose conversion technique using a NaI(Tl) detector for assessment of exposure dose rate from environmental radiation / G. Cho, H.K. Kim, H. Woo // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 1998. – No. 45. – P. 981–985.

9. Moriuchi, S. Construction of Response Matrices for Various Cylindrical and Spherical NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays and the Test Results / S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito // *Japanese Journal of Health Physics*. – 2009. – No. 44. – P. 122–133.

10. Фоков, Г.А. Расчет аппаратных функций отклика стандартного NaI детектора гамма-излучения с помощью универсального программного кода *SNEGMONT* / Г.А. Фоков, Г.И. Шульгович // *Сборник материалов XIV ежегодного семинара «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ»*. – Обнинск : ФГОУ «ГЦИПК», 2008. – С. 145–158.

11. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomtex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf>. – Дата доступа: 04.07.2017

Reference

1. Moriuchi S. A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator. *JAERI 1209*, Japan Atomic Energy Research Institute, 1970 (in Japanese).
2. Moriuchi S., Nagoya T., Sakamoto S., Saito K. Determination of spectrum-dose conversion operator for spherical NaI(Tl) scintillators, *JAERI-M 8092*, Japan Atomic Energy Research Institute, 1972 (in Japanese).
3. Moriuchi S., Satsuma M., Saito K. Development of a dissymmetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation. *Proc. 10-th IRPA International Congress*, Hiroshima, May 2000, p-3b-197.
4. Fominykh V.I., Shulgovich G.I., Kozhemiakin V.A. Measurement of small levels of gamma radiation by spectrometric method using the «spectrum-dose» operator. *Metrologiya* [Metrology], no. 10, 1983, pp. 32–39. (in Russian)
5. Aoyama K., Masui K., Yamamura S., Nakamura T., Yabutani T., Namito Y. Development of low-energy x-ray survey-meter, radiation detectors and their uses. *KEK Proceedings*, 2006, 7 November, pp. 57–67.
6. Yamamura Seini, Nakamura Takashi, Itou Katsuhito, Hatakeyama Osamu, Masui Kaoru. Development of

wide-energy range X/gamma-ray survey-meter. *Journal of Nuclear Science and Technology*, no. 45, iss. 5, 2008, pp. 187–190. doi: 10.1080/00223131.2008.10875818

7. Babenko V.V., Isaev A.G. Spectrometric method for the measurement of the absorbed dose of gamma radiation using a NaI(Tl) detector. *Spektrometricheskii analiz. Apparatura i obrabotka dannykh na PEVM* [Proc. XI annual seminar «Spectrometric Analysis. Equipment and data processing on PC»]. Obninsk, Federal State Educational Institution «GICPK» Publ., 2005, pp. 67–77 (in Russian).

8. Cho G., Kim H.K., Woo H. Electronic dose conversion technique using a NaI(Tl) detector for assessment of exposure dose rate from environmental radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, no. 45, 1998, pp. 981–985. doi:10.1109/23.682692

9. Moriuchi S., Tsutsumi M., Saito K. Construction of Response Matrices for Various Cylindrical and Spheri-

cal NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays and the Test Results. *Japanese Journal of Health Physics*, no. 44, 2009, pp. 122–133.

10. Fokov G.A., Shulgovich G.I. Calculation of the instrumental response functions of a standard NaI gamma-ray detector using the universal program code SNEGMONT. *Spektrometricheskii analiz. Apparatura i obrabotka dannykh na PEVM* [Proc. XI annual seminar «Spectrometric Analysis. Equipment and data processing on PC»]. Obninsk, Federal State Educational Institution «GICPK» Publ., 2008, pp. 145–158 (in Russian).

11. *Dozimetricheskaya ustanovka gamma-izlucheniya UDG-AT110* [AT110 Gamma Beam Irradiator with Calibration Bench]. Available at: <http://www.atom-tex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf> (accessed 04.07.2017).

УДК 621.375.826

Учет влияния дестабилизирующих факторов для повышения точности измерений дальномера на основе стереоизображений

Козлов В.Л.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь

Поступила 09.07.2017

Принята к печати 11.08.2017

Широкое использование цифровой фотосъемки обусловило значительный прогресс в развитии теории и методов восстановления трехмерной картины пространства по двумерным цифровым изображениям. Для решения задачи повышения точности измерений таких систем необходимо учитывать влияние ряда дестабилизирующих факторов. Целью данной работы являлась разработка методики учета и компенсации влияния дестабилизирующих факторов, таких как отклонение от горизонтальной линии положения камер стереопары, непараллельность оптических осей объективов, взаимный наклон фотоприемных матриц и искажения оптической системы стереокамеры для повышения точности измерений дальномера на основе корреляционного анализа стереоизображения.

Разработано программное приложение для анализа оптических искажений серийно выпускаемых объективов, позволяющее наглядно показать характер искажений и определить коэффициенты полинома, компенсирующего оптические искажения. Получено, что для стереофотокамеры *Fujifilm FinePix Real 3D* дисторсия цифрового изображения достигает величины $\pm 20\text{--}35$ пикселей на краях фотоприемной матрицы и неодинакова для первого и второго объективов. Различия в значениях оптических искажений обусловлены неодинаковым наклоном фотоприемной матрицы к оптической оси объектива. Экспериментально определены полиномы, компенсирующие искажения оптической системы первого и второго объективов стереокамеры.

Получено выражение для расчета дальности до объекта по стереоизображению с учетом компенсации оптических искажений. Показано, что для повышения точности измерения расстояний определяющим фактором является не абсолютное значение дисторсии объективов, а разность вносимых оптических искажений объективов стереокамеры в зависимости от разности координат измеряемого объекта на фотоприемных матрицах. Экспериментальные исследования разработанной методики компенсации искажений показали уменьшение абсолютной погрешности измерений более чем на порядок при измерениях на расстояниях до 100 м.

Ключевые слова: цифровое изображение, стереокамера, дисторсия, фотоприемная матрица.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Address for correspondence:

Kozlov V.L.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Для цитирования:

Козлов В.Л.
Учет влияния дестабилизирующих факторов для повышения точности измерений дальномера на основе стереоизображений.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 254–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

For citation:

Kozlov V.L.
[Consideration of the Destabilizing Factors Influence for Increasing of the Measurements Accuracy of a Rangefinder Based on Stereo Images].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 254–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

Consideration of the Destabilizing Factors Influence for Increasing of the Measurements Accuracy of a Rangefinder Based on Stereo Images

Kozlov V.L.

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus

Received 09.07.2017

Accepted for publication 11.08.2017

Abstract

The wide using of digital photography has led to significant progress in the development of the theory and methods of restoring the three-dimensional space picture on base of two-dimensional digital images. To solve the problem of increasing the measurements accuracy of such systems, it is necessary to take into account the influence of a number of destabilizing factors. The aim of this work was development of technique for accounting and compensating of destabilizing factors influence, such as the deviation from the horizontal position line of the stereo pair lens, the non-parallelism of the lenses optical axes, the mutual inclination of the photo detector matrices, and the distortion of the stereo camera optical system for increasing of the measurements accuracy of rangefinder based on the correlation analysis of the stereo image.

A software application has been developed for analyzing the optical distortions of serially produced lenses, which allows to visually demonstrate the distortions nature and to determine the polynomial coefficients for compensating of the optical distortion. It is obtained that for the Fujifilm FinePix Real 3D stereo camera the distortion of the digital image reaches ± 20 – 35 pixels at the edges of the photo detective matrix and is not the same for the first and second lenses. The difference in the optical distortion values is due to the unequal slope of the photo detector matrix to the optical axis of the objective. Compensating polynomials for the optical system distortions of the first and second lenses of the stereo camera are experimentally determined.

The range object expression from the stereo images taking into account the optical distortion compensation is obtained. It is shown for increasing of the measurements accuracy, the determining factor is not the absolute value of the lenses distortion, but the difference in the optical distortions of the stereo camera lenses, depending on the difference of the measured object coordinates of the on the photo detective matrices. Experimental studies of the developed technique for distortions compensation showed a decrease of the absolute measurements error more than by an order of magnitude at distances up to 100 m.

Keywords: digital image, stereo camera, distortion, photodetector matrix.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Address for correspondence:

Kozlov V.L.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Для цитирования:

Козлов В.Л.
Учет влияния дестабилизирующих факторов для повышения точности измерений дальномера на основе стереоизображений. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 3. С. 254–262.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

For citation:

Kozlov V.L.
[Consideration of the Destabilizing Factors Influence for Increasing of the Measurements Accuracy of a Rangefinder Based on Stereo Images]. *Devices and Methods of Measurements*. 2017, vol. 8, no. 3, pp. 254–262 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-254-262

Введение

Широкое использование цифровой фотосъемки обусловило значительный прогресс в развитии теории и методов восстановления трехмерной картины пространства по двумерным цифровым изображениям. На сегодняшний день разработано достаточно много технологий для цифрового восстановления трехмерной картины пространства. Методы измерения размерных параметров и координат 3D-объектов можно разделить на контактные (координатно-измерительные машины, механические щупы, методы, основанные на получении срезов объекта) и бесконтактные (стерео-бинокулярные системы, лазерное и рентгеновское сканирование, структурированное освещение) [1]. Однако наиболее эффективными и универсальными являются современные методики восстановления трехмерной модели сцены с использованием двух цифровых изображений (стереопары) [2, 3]. Возможность измерения расстояний и размеров объектов по анализу фотографических изображений может дать значительный экономический эффект при использовании, например, в области зрения мобильных роботов, для решения задач строительства и архитектуры, в геодезии и картографии, в криминалистике для повышения оперативности и качества фиксации следов совершенного преступления, для решения военных задач и т.п. Задача определения дальности и координат объекта сводится к задаче поиска соответствующих точек объекта на стереопаре. По паре соответствующих точек и информации о взаимном расположении камер выполняется триангуляция и определяются координаты их прообраза в трехмерном пространстве. Зная трехмерные координаты прообраза, можно вычислить глубину как расстояние до плоскости камеры. Из-за обратной зависимости глубины и смещения разрешающая способность систем стереозрения обратно пропорциональна расстоянию до сканируемой сцены [3].

В России производится ряд фотограмметрических комплексов, позволяющих измерять расстояния и размеры объектов на основании анализа цифровых фотографических изображений. Основной недостаток этих комплексов заключается в том, что для проведения измерений в них необходимо использовать мерные объекты и маркировочные конусы, расположенные в центре измеряемой зоны, что существенно ограничивает функциональные возможности. Кроме того, точность измерения таких систем составляет всего 1–3 % от

измеряемого расстояния, а диапазон измеряемых расстояний – до 60 м, что в большинстве случаев недостаточно. Из этого следует, что разработка методик повышения точности измерений таких систем является актуальной задачей.

Для решения задачи повышения точности измерения расстояний необходимо учитывать влияние ряда дестабилизирующих факторов и, соответственно, разработать методики устранения их влияния. Первым фактором является отклонение от горизонтальной линии положения камер стереопары. Использование для решения этой задачи известных методов ректификации [4] нецелесообразно, так как в ходе ректификации происходят неизбежные искажения изображений, что вызывает дополнительные трудности сопоставления стереоизображений и, соответственно, снижает точность измерения расстояний. Вторым фактор связан с учетом непараллельности оптических осей объективов стереокамеры и взаимным наклоном фотоприемных матриц. Третьим важным фактором, ограничивающим точность измерений, являются искажения изображения, вносимые оптической системой стереокамеры, главным образом дисторсией объективов. Известны ряд методик автоматического определения и коррекции дисторсии цифровых изображений [5–7]. Однако в литературных источниках отсутствует анализ влияния дисторсии на точность измерения расстояний по стереоизображению, а также не приводятся способы учета и компенсации влияния этого параметра на точность.

Целью работы являлась разработка методик учета и компенсации влияния дестабилизирующих факторов, таких как отклонение от горизонтальной линии положения камер стереопары, непараллельность оптических осей объективов, взаимный наклон фотоприемных матриц и искажения оптической системы стереокамеры для повышения точности измерений дальномера на основе корреляционного анализа стереоизображения.

Компенсация непараллельности оптических осей фотокамеры

Методика измерения расстояний и размеров объектов по анализу цифровых фотографических изображений, не использующая мерный объект, основана на принципах фотограмметрии и корреляционной обработки цифровых изображений [8]. Для определения расстояния R используется стереоскопическая система. В системе регистрируются

два изображения объектов под различными ракурсами, и затем, сопоставляя эти изображения, удастся реконструировать трехмерную структуру сцены. Если расстояние между камерой и наблюдаемой сценой значительно превышает фокусное расстояние оптической системы, то можно считать, что изображение строится в ее фокальной плоскости. В современных фотокамерах для регистрации цифрового изображения в плоскости изображения устанавливается фотоприемная матрица. Дальность до объекта R из геометрии изображений определяется из соотношения [8]:

$$R = \frac{f \cdot L}{\omega_x (x' - x'')}, \quad (1)$$

где $(x' - x'') = \Delta x$ – смещение (диспаратность) объекта в плоскости изображения по оси X в пикселях на первом и втором снимках стереопары; L – величина базы; f – фокус оптической системы; ω_x – расстояния между чувствительными элементами фотоприемной матрицы по оси X .

Схема стереоскопической системы и приведенная формула (1) предполагают, что оптические оси объективов параллельны и фотоприемные матрицы находятся на одной прямой, параллельной оси OX . Однако в реальной регистрирующей системе это реализовать достаточно трудно, поэтому одним из источников погрешностей в описанной методике является отклонения от горизонтальной линии положения фотокамер стереопары. Методика учета этого фактора поясняется рисунком 1 и заключается в следующем [8].

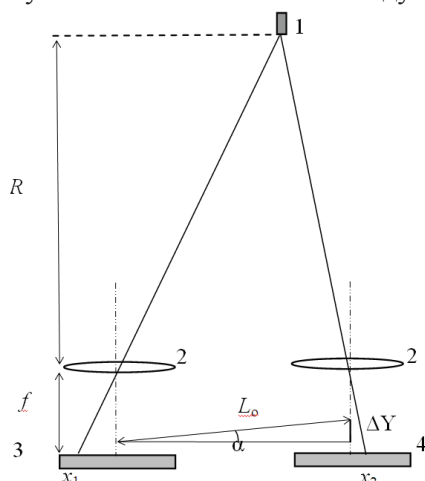


Рисунок 1 – Стереоскопическая система со сдвигом между фотокамерами по оси OY : 1 – измеряемый объект; 2 – линзы; 3, 4 – фотоприемные матрицы камер

Figure 1 – Stereoscopic system with a shift between cameras in the OY axis: 1 – measured object; 2 – lens; 3, 4 – photodetector array of cameras

Если имеется сдвиг между фотокамерами по вертикальной оси ΔY (при этом оптические оси объективов камер параллельны), то расстояние между фотокамерами по горизонтальной оси не будет равно L_0 , а будет определяться следующим образом: $L = L_0 \cos \alpha$, где L_0 – расстояние между фотокамерами в пространстве; α – угол между горизонтальной осью и линией, соединяющей фотокамеры. При этом сдвиг между изображениями объекта на фотокамерах по вертикальной оси не будет равен нулю $\Delta y \neq 0$. Определив сдвиг между изображениями объекта по горизонтальной и вертикальной осям $\Delta x = (x' - x'')$ и $\Delta y = (y' - y'')$, можно найти угол α из выражения $\tan \alpha = \Delta y / \Delta x$. Таким образом, по сдвигу между изображениями по горизонтали Δx определяется дальность до объекта, а по положению максимума корреляционной функции по вертикальной оси Δy – отклонение от горизонтальной линии положения двух фотокамер, при этом расчетная формула для дальности до объекта R приобретает вид:

$$R = \frac{f \cdot L}{\omega_x \cdot \Delta x} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} \right). \quad (2)$$

Другим источником измерительных ошибок в приведенной выше методике измерения расстояний является непараллельность оптических осей фотокамеры при получении первого и второго изображений, пример которой представлен на рисунке 2. Если оптические оси объективов первой и второй фотокамер сдвинуты на угол φ , то при определении сдвига между изображениями $\Delta x = (x' - x'')$ будет присутствовать постоянная ошибка ΔX , обусловленная этим фактором, равная $\Delta X = f \cdot \tan \varphi$. Так как в приведенной формуле отсутствует расстояние до объекта, то сдвиг ΔX будет одинаков для всех объектов, одновременно попадающих в поле зрения фотокамеры. Для устранения таких измерительных ошибок в расчетную формулу вводится величина сдвига ΔX , при этом выражение для расчета дальности до объекта будет иметь вид:

$$R = \frac{f \cdot L}{\omega_x (\Delta x - \Delta X)} \cdot \cos \left(\arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} \right), \quad (3)$$

где ΔX – сдвиг по горизонтальной оси между изображениями объекта за счет непараллельности оптических осей (знак перед ΔX зависит от угла наклона оптических осей).

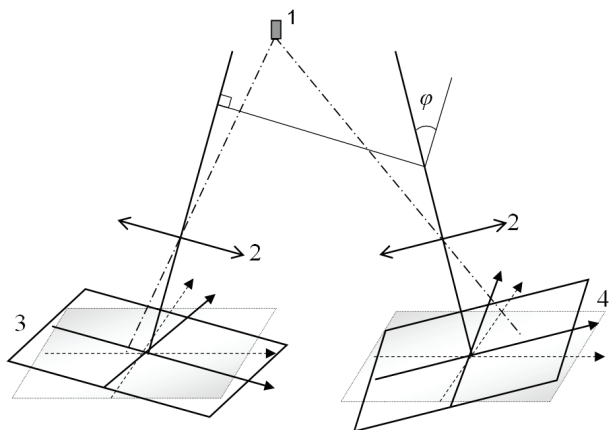


Рисунок 2 – Учет непараллельности оптических осей стереокамеры: 1 – измеряемый объект; 2 – линзы; 3, 4 – фотоприемные матрицы камер

Figure 2 – Taking into account the nonparallelity of the optical axes of the stereo camera: 1 – measured object; 2 – lens; 3, 4 – photodetector array of cameras

Значение Δx можно определить в результате калибровки системы по объекту, находящемуся на фотоснимке на максимальном расстоянии. Исследование данной методики измерений производилось с помощью фотокамеры *Canon PowerShot A550* с матрицей размером 7,1 мегапикселей и фокусом объектива 5,8 мм. Результаты показали, что при измерениях на малых расстояниях сдвиг между изображениями Δx составляет сотни и тысячи пикселей, а при расстоянии до объекта порядка 2000 м сдвиг будет 0,7 пикселя. Если разрешение системы обработки изображений составляет 1 пиксель, то калибровка по объекту на расстоянии более 1500 м обеспечит учет отклонения положения оптических осей фотокамеры от параллельного, не увеличивая при этом неопределенность измерений. В случае, когда для измерений используется 3D-фотокамера с жестко закрепленными объективами, значение сдвига Δx можно определить путем калибровки по объекту, находящемуся на известном расстоянии.

Другая методика компенсации непараллельности оптических осей фотокамеры при получении первого и второго изображений с использованием жестко соединенного с фотокамерой коллиматора, оптическая ось которого перпендикулярна оптической оси фотокамеры, приводится в [9]. После получения первого снимка фотокамеру перемещают на заданное расстояние L , затем совмещают перекрестие объектива коллиматора с тем же тест-объектом, что и при первом снимке, и получают второй снимок. Использование системы камера-коллиматор позволяет избежать

связанных с поворотом камеры ошибок и существенно увеличить базу съемки, что положительно сказывается на точности измерений.

Учет влияния искажений оптической системы стереокамеры

Одним из основных источников измерительных ошибок при восстановлении дальности по анализу цифрового изображения являются искажения, вызванные оптической системой стереокамеры, главным образом дисторсией. Дисторсия – это aberrация оптических систем, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по полю зрения объектива. При этом нарушается геометрическое подобие между объектом и его изображением. Так как линзы в реальных камерах обычно не обладают идеальной формой и расположением относительно матрицы, то получаемое изображение будет подвергнуто искажениям, которые нужно учитывать, чтобы иметь возможность использовать модель проективной камеры, описанную выше. Оптические искажения, вносимые линзой на фотоприемную матрицу, подразделяются на два вида: радиальные и тангенциальные. Радиальные искажения возникают из-за того, что физическая линза имеет неправильную форму. Например, в некоторых камерах используют не параболические, а сферические линзы, которые проще в изготовлении. В результате возникают искажения изображения, усиливающиеся от центра к краям. Тангенциальные искажения возникают из-за того, что линза в камере расположена непараллельно плоскости матрицы [5–7, 10].

Наиболее распространенным способом компенсации дисторсий камеры является предварительная калибровка с использованием специального калибровочного объекта, помещаемого в поле зрения камеры. В качестве калибровочного объекта может выступать как периодическая структура, так и случайная текстура с определенными статистическими свойствами [11]. Также находят свое применение и методы, не требующие специального калибровочного объекта, но использующие несколько зарегистрированных изображений одной и той же сцены. Такие методы опираются на априорную информацию о геометрии сцены и решают задачу калибровки с учетом ограничений эпиполярной геометрии [5]. При этом на практике возникает ситуация, когда отсутствует возможность получить с ка-

меры требуемые изображения. В этом случае параметры дисторсии могут быть оценены на основе анализа самого изображения. Такой аналитический способ исправления геометрических искажений получил название автоматической (или слепой) калибровки [6]. Наибольшее распространение получили методы, основанные на предположении, что исследуемая сцена содержит большое количество прямых линий, которые остаются прямыми при центральном проецировании, но приобретают кривизну вследствие радиальной дисторсии [7]. Однако в литературных источниках не приводятся результаты исследований по анализу влияния дисторсии на точность измерения расстояний по стереоизображению, а также не разработаны методики учета и компенсации влияния этого параметра на точность измерений.

Для анализа оптических искажений объектов фотокамер было разработано программное приложение, позволяющее наглядно показать характер искажений и определить коэффициенты полинома, компенсирующего оптические искажения. Были проведены экспериментальные исследования оптических искажений следующих объективов и фотокамер:

- Canon EOS 1100D (с объективом EFS 18-55);
- Nikon D3200 (с объективами AF-SDX NIKKOR 18-55; AF-S NIKKOR 18-105; TAMRON AF 70-300);
- Canon PowerShot A550;
- Fujifilm FinePix Real 3D W3.

Выбор в качестве объекта исследования серийно выпускаемой 3D-фотокамеры Fujifilm FinePix Real 3D обусловлен тем, что она используется в качестве компактного решения аппаратной части дальномера на основе корреляционного анализа цифровых изображений. На рисунках 3, 4 приведены результаты измерения оптических искажений объективов фотокамер Canon EOS 1100D и Fujifilm FinePix Real 3D. В горизонтальной плоскости по осям OX и OY приведены координаты точки на фотоприемной матрице, а по вертикальной оси приведена величина оптических искажений в пикселях для данной точки по оси OX (рисунок 3) и по оси OY (рисунок 4).

Экспериментальные исследования показали, что оптические искажения исследуемых объективов Canon и Nikon можно успешно аппроксимировать известными формулами [12]. Скорректированные точки для радиальных искажений можно получить с помощью следующих выражений:

$$x_{corrected} = x(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6), y_{corrected} = y(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6), \quad (4)$$

где (x, y) – координаты точки исходного изображения; r – удаленность точки от оптического центра линзы.

Тангенциальные искажения определяются двумя параметрами p_1 и p_2 :

$$x_{corrected} = x+2p_1y+p_2(r^2+2x^2); y_{corrected} = y+p_1(2r^2+2y^2)+2p_2x. \quad (5)$$

Таким образом, общая модель искажения характеризуется пятью параметрами, которые составляют вектор искажения $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$. Остальные искажения, возникающие в оптической системе, вносят значительно меньший вклад и их можно не учитывать [12].

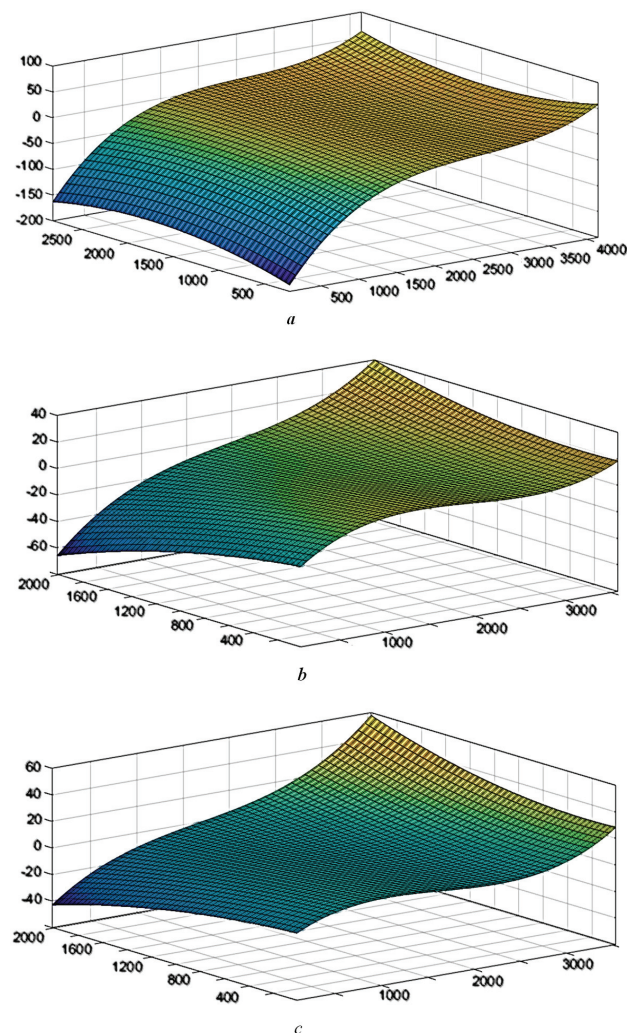


Рисунок 3 – X-компоненты искажений для Canon EOS 1100D с объективом EFS 18-55 (a), левого (b) и правого (c) объективов Fujifilm FinePix Real 3D

Figure 3 – X-component distortion for Canon EOS 1100D with lens EFS 18-55 (a), left (b) and right (c) lenses of Fujifilm FinePix Real 3D

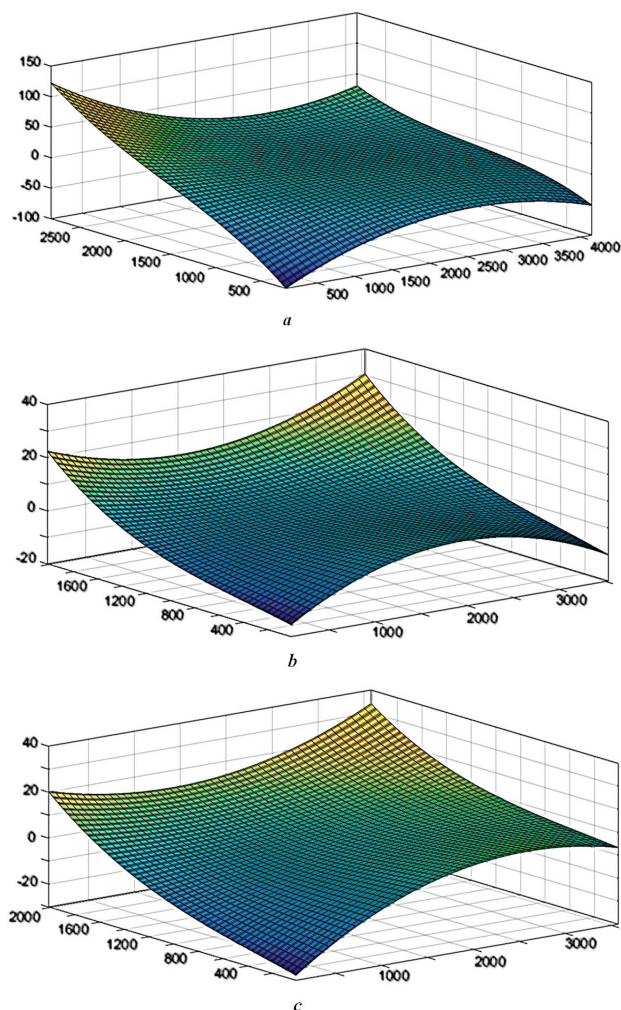


Рисунок 4 – Y-компоненты дисторсии для Canon EOS 1100D с объективом EFS 18–55 (a), левого (b) и правого (c) объективов Fujifilm FinePix Real 3D

Figure 4 – Y-component distortion for Canon EOS 1100D with lens EFS 18–55 (a), left (b) and right (c) lenses of Fujifilm FinePix Real 3D

Однако, как показали результаты проведенных исследований для фотоаппарата Fujifilm FinePix Real 3D W3, использование формул (4, 5) для компенсации дисторсии не обеспечивает требуемую точность при измерении расстояний, поэтому для компенсации дисторсии были проведены дополнительные исследования. Для используемой фотокамеры Fujifilm FinePix Real 3D W3 дисторсия цифрового изображения неодинакова для объективов стереокамеры и достигает величины ± 20 –35 пикселей на краях фотоприемной матрицы. Различие в значениях оптических искажений для двух объективов обусловлены неодинаковым наклоном фотоприемной матрицы к оптической оси объектива. Из полученных экспериментальных данных следует, что для аппроксимации оптических искажений объективов Fujifilm FinePix

Real 3D W3 достаточно полинома третьей степени. Взаимный наклон плоскостей фотоприемных матриц и оптические aberrации приемных линз можно компенсировать с помощью нелинейного полинома P , имеющего следующий вид:

$$P = \sum_{n,m,k} (P_{n0}x^n + P_{0m}y^m + P_{klk2}x^{k1}y^{k2}), \quad (6)$$

где P_{n0} , P_{0m} , P_{klk2} – экспериментально определенные калибровочные коэффициенты; $n, m = 1 - 3$; $k_1, k_2 = 1 - 2$; x, y – координаты точки измерений на фотоприемной матрице по горизонтали и вертикали соответственно.

Экспериментально определенные полиномы, компенсирующие искажения оптической системы первого P' и второго P'' объективов стереокамеры Fujifilm FinePix Real 3D, имеют вид:

$$P' = -12,1738 + 3,90 \cdot 10^{-2} \cdot x - 2,68 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 5,37 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 5,07 \cdot 10^{-3} \cdot y - 5,68 \cdot 10^{-6} \cdot y^2 + 2,59 \cdot 10^{-10} \cdot y^3 + 5,85 \cdot 10^{-7} \cdot xy + -1,51 \cdot 10^{-10} \cdot x^2y + 4,49 \cdot 10^{-9} \cdot xy^2, \quad (7)$$

$$P'' = -22,3481 + 5,38 \cdot 10^{-2} \cdot x - 3,00 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 5,07 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot y - 6,36 \cdot 10^{-6} \cdot y^2 - 1,96 \cdot 10^{-10} \cdot y^3 + 5,51 \cdot 10^{-6} \cdot xy + -1,83 \cdot 10^{-11} \cdot x^2y + 4,04 \cdot 10^{-9} \cdot xy^2. \quad (8)$$

Важно отметить, что значениями коэффициентов полинома порядка 10^{-10} нельзя пренебрегать, так как они находятся при переменных в третьей степени, а величины x и y могут иметь значение приблизительно равное $(3-4) \cdot 10^3$.

В расчетные формулы для измерения дальности (1)–(3) входят фокус оптической системы f , база съёмки L и размер пикселя ω_x , которые можно объединить в аппаратную константу K :

$$K = \frac{f \cdot L}{\omega_x}. \quad (9)$$

Знать точное значение расстояния между чувствительными элементами фотоприемной матрицы ω_x , значение фокуса объектива и базы съёмки нет необходимости, так как значение аппаратной константы измерительной системы K можно определить при калибровке системы по объектам, находящимся на известных расстояниях.

Таким образом, с учетом компенсации оптических искажений первого и второго объективов стереокамеры выражение для расчета дальности до объекта по стереоизображению имеет вид:

$$Z = \frac{K \cos\left(\arctg \frac{\Delta y}{\Delta x}\right)}{\Delta x - \Delta X + P' - P''}, \quad (10)$$

где K – аппаратная константа измерительной системы (9); Δx – сдвиг между изображениями объекта по горизонтальной оси; Δy – сдвиг между изображениями объекта по вертикальной оси; ΔX – сдвиг по горизонтальной оси между изображениями объекта за счет непараллельности оптических осей объективов; P' , P'' – полиномы, компенсирующие искажения объективов стереокамеры.

Необходимо отметить, что для повышения точности измерения расстояний определяющим фактором является не абсолютное значение дисторсии объективов, а разность вносимых оптических искажений объективов стереокамеры в зависимости от разности координат положения измеряемого объекта на фотоприемных матрицах. Экспериментальные исследования разработанной методики учета и компенсации влияния искажений на точность измерений дальномера на основе корреляционного анализа стереоизображения показали уменьшение абсолютной погрешности измерений более чем на порядок при измерениях на расстояниях до 100 м.

Заключение

Предложена и обоснована методика компенсации искажений, вносимых оптической системой стереокамеры, непараллельностью оптических осей объективов, взаимным наклоном фотоприемных матриц, заключающаяся в использовании при вычислении дальности экспериментально определенных полиномов, компенсирующих упомянутые искажения в зависимости от координат объекта на фотоприемных матрицах стереокамеры.

Разработано программное приложение для анализа оптических искажений серийно выпускаемых объективов, позволяющее наглядно показать характер искажений и определить коэффициенты полинома, компенсирующего оптические искажения. Экспериментальные исследования показали, что оптические искажения исследуемых объективов *Canon* и *Nikon* можно аппроксимировать известными формулами, при этом обеспечивается достаточно высокая точность измерения расстояний с использованием таких объективов.

Для стерео фотокамеры *Fujifilm FinePix Real 3D W3* использование упомянутых формул для компенсации искажений не обеспечивает требуемую точность при измерении расстояний. Дисторсия цифрового изображения стереокамеры *Fujifilm Fine* достигает величины ± 20 –35 пикселей на краях фотоприемной матрицы и неодинакова для первого и второго объектива. Различия в значениях оптических искажений для двух объективов обусловлены неодинаковым наклоном фотоприемной матрицы к оптической оси объектива. Экспериментально определены полиномы, компенсирующие искажения оптической системы первого и второго объективов стереокамеры. Получено выражение для расчета дальности до объекта по стереоизображению с учетом компенсации оптических искажений объективов стереокамеры. Для повышения точности измерения расстояний определяющим фактором является не абсолютное значение дисторсии объективов, а разность вносимых оптических искажений объективов стереокамеры в зависимости от разности координат измеряемого объекта на фотоприемных матрицах. Экспериментальные исследования разработанной методики компенсации искажений показали уменьшение абсолютной погрешности измерений более чем на порядок при измерениях на расстояниях до 100 м.

Список использованных источников

1. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Д. Стокман. – М.: БИНОМ, 2006. – С. 752.
2. Золотухин, Д.А. Реконструкция и фильтрация трехмерной формы микрообъекта по стереопаре изображений с параллельной проекцией / Д.А. Золотухин, И.В. Сафонов, К.А. Крыжановский // Механика, управление и информатика. – 2012. – Т. 9, № 9. – С. 174–179.
3. Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
4. Hartley, R.I. Theory and practice of projective rectification / R.I. Hartley // International Journal of Computer Vision. – 1999. – Vol. 35, no. 2. – P. 115–127.
5. Zhang, Z. Camera calibration with lens distortion from low-rank textures / Z. Zhang, Y. Matsushita, Y. Ma // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference. – 2011. – P. 2321–2328.
6. Alemán-Flores, M. Automatic Lens Distortion Correction Using One-Parameter Division Models / M. Alemán-Flores, L. Alvarez, L. Gomez, D. Santana-Cedres // Image Processing On Line. – 2014. – Vol. 4. – P. 327–343.
doi: 10.1007/s10851-012-0342-2.

7. Бугаенко, Е.И. Способ автоматического определения и коррекции радиальной дисторсии на цифровых изображениях / Е.И. Бугаенко, М.И. Труфанов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, №2. – С. 16–22.

8. Способ измерения расстояний на цифровой фотокамере: патент № 2485443 Российской Федерации / В.Л. Козлов. – 2013. – Бюл. № 17.

9. Способ определения расстояния до объекта посредством цифровой фотокамеры: патент № 18666 Республика Беларусь / В. Л. Козлов. – 2014. – № 5. – С. 95.

10. Titov, D.V. Correction Device of Distortion / D.V. Titov, T.A. Shirabakina // Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems. Proc. 5th Int. Conf. Spain. – 2007. – P. 122–124.

11. Кунина, И.А. Слепая компенсация радиальной дисторсии на одиночном изображении с использованием быстрого преобразования Хафа / И.А. Кунина, С.А. Гладилин, Д.П. Николаев // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 395–403.

12. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

References

1. Shapiro, L. Computer vision / L. Shapiro, D. Stockman – Moscow: BINOM, 2006. – 752 p.

2. Zolotukhin, D.A. Reconstruction and filtration of a three-dimensional shape of a microobject by a stereopair of images with a parallel projection. Zolotukhin, I.V. Safonov, K.A. Kryzhanovsky // Mechanics, management and informatics. – 2012. – V. 9, No. 9. – P. 174–179. (in Russian)

3. Forsythe, D. Computer vision. Modern approach / D. Forsythe, J. Pons. – Moscow: Williams, 2004. – 928 p.

4. Hartley, R.I. Theory and practice of projective rectification / R.I. Hartley // International Journal of Computer Vision. – 1999. – Vol. 35, № 2. – P. 115–127, doi: 10.1023/A:1007957826135.

5. Zhang, Z. Camera calibration with lens distortion from low-rank textures / Z. Zhang, Y. Matsushita, Y. Ma // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference. – 2011. – P. 2321–2328 - DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995548.

6. Alemán-Flores, M. Automatic Lens Distortion Correction Using One-Parameter Division Models / M. Alemán-Flores, L. Alvarez, L. Gomez, D. Santana-Cedres // Image Processing On Line. – 2014. – Vol. 4. – P. 327–343., doi: 10.1007/s10851-012-0342-2.

7. Bugaenko, EI A method for automatic detection and correction of radial distortion on digital images / EI Bugaenko, MI Trufanov // Izv. Universities. Instrument making. – 2008. – V. 51, No. 2. – P. 16–22. (in Russian)

8. Method for measuring distances on a digital camera: patent 2485443 Russian Federation, / VL Kozlov. – 2013. – Bul. No. 17.

9. Method for determining the distance to the object through a digital camera: pat. 18666 Rep. Belarus, / V.L. Kozlov; – 2014. – No. 5. – P. 95.

10. Titov D. V., Shirabakina T. A. Correction Device of Distortion // „Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems". Proc. 5th Int. Conf. Spain, 2007. – P. 122–124.

11. Kunina, I.A. Blind compensation of radial distortion on a single image using a fast Hafa transformation. Kunina, S.A. Gladilin, D.P. Nikolaev // Computer Optics. – 2016. – V. 40, No. 3. – P. 395–403. (in Russian)

12. Gonzalez, R. Digital image processing / R. Gonzalez, R. Woods. – Moscow: Technosphere, 2005. – 1072 p.

УДК 620.179.16

Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении

Муравьев В.В., Тапков К.А.

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

Поступила 17.07.2017

Принята к печати 19.08.2017

Одной из наиболее частых причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе и рельсов, является высокий уровень остаточных напряжений, которые могут достигать предела текучести, особенно в области дефектов. Знание величины внутренних напряжений в рельсах позволит получить информацию об их техническом состоянии, благодаря чему можно избежать аварийных ситуаций. Цель работы заключалась в создании модели напряженно-деформированного состояния рельса с учетом термического упрочнения головки и подошвы и дальнейшего сопоставлении результатов моделирования с измерениями напряжений, полученных в ходе эксперимента.

Создание, а также расчет модели методом конечных элементов проводился в программной среде COMSOL. К головке и подошве рельса в продольном направлении были приложены силы, вызывающие сжимающие напряжения, к шейке рельса – силы, вызывающие растягивающие напряжения. Уровень напряжений, полученный при расчете модели рельса, был сопоставлен с соответствующим расхождением паза, который является информативным параметром при оценке уровня остаточных напряжений согласно действующему стандарту. Экспериментальные измерения выполнялись акустическим структуроскопом СЭМА, в основе которого лежит использование явления акустоупругости. Измерения выполнялись на пяти полнопрофильных пробах рельса.

Согласно результатам расчета модели, критическому уровню расхождения паза в 2 мм соответствует следующий уровень максимальных напряжений: –54 МПа в головке, 86 МПа в шейке и –62 МПа в шейке рельса. При проведении экспериментального исследования для различных рельсов получены следующие значения: от –48 МПа до –64 МПа в головке, от 54 МПа до 93 МПа в шейке рельса, от –59 МПа до –74 МПа в подошве рельса, погрешность измерения составила ± 5 МПа.

Таким образом создана модель, позволяющая проводить анализ напряженно-деформированного состояния рельса и сопоставлять значение напряжений в рельсе с расхождением паза, выполненного в полнопрофильной пробе рельса. Результаты моделирования остаточных напряжений показали совпадение характера распределения напряжений с экспериментально полученными данными по пяти пробам рельсов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, рельс, моделирование, напряженно-деформированное состояние.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

Адрес для переписки:

Тапков К.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: izhjup@gmail.ru

Address for correspondence:

Tapkov K.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: izhjup@gmail.ru

Для цитирования:

Муравьев В.В., Тапков К.А.
Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов
при изготовлении.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

For citation:

Muravev V.V., Tapkov K.A.
[Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production

Muravev V.V., Tapkov K.A.

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

Received 17.07.2017

Accepted for publication 19.08.2017

Abstract

High values of residual stresses is one of the most common reason of breaking lots of metal constructions, including rails. These stresses can reach values of flow limit, especially in the area of faults. Estimation of residual stresses values allows to get information about technical condition of the rail and also allow to avoid abnormal situations. So, the aim of the research is creating the model of stress-strain state of the rail, which was hardened in its top and bottom, and to compare modeling results with experimental measurements of stresses and discrepancy of the housing.

For creating the model and making evaluations by finite element method we used a program COMSOL. Forces on the top and bottom of the rail cause tension stresses, forces on the web of the rail cause tensile stresses. We compared calculated values of stresses with discrepancy of the housing. The discrepancy of the housing is informative characteristic for estimating the residual stresses according to standards. For experimental measurements we used an acoustic structuroscope SEMA. This structuroscope uses the acoustoelastic phenomenon for measurements. We made measurements of the five rails.

According to the calculation results of the model, critical discrepancy of the housing in 2 mm corresponded to the following values of maximum stresses: –54 MPa in the top of the rail, 86 MPa in the web and –62 MPa in the bottom of the rail. Experimental measurements are the following: from –48 MPa to –64 MPa in the top of the rail, 54 MPa to 93 MPa in the web of the rail, and –59 MPa to –74 MPa in the bottom of the rail. Absolute error was ± 5 MPa.

Thus we created the model, which allowed to analyze strain-stress state and compare real values of stresses with discrepancy of the housing. Results of the modeling showed coincidence with structure of distribution of residual stresses in five probes of rails.

Keywords: non-destructive testing, acoustoelasticity, rail, modeling, strain-stress state.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

Адрес для переписки:

Тапков К.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: izhjup@gmail.ru

Address for correspondence:

Tapkov K.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: izhjup@gmail.ru

Для цитирования:

Муравьев В.В., Тапков К.А.
Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов
при изготовлении.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 263–270.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

For citation:

Muravev V.V., Tapkov K.A.
[Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 263–270 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270

Введение

Особую роль в обеспечении безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта играет надежность верхнего строения пути, а именно рельсов, наличие опасных дефектов в которых может привести к сходу подвижного состава.

В общем случае прочность элементов конструкций и машин, а также их ресурс задаются на стадии разработки и проектирования. Однако воздействие на деталь знакопеременных нагрузок, коррозионных сред, колебаний температуры и наличие в материале детали технологических или эксплуатационных дефектов существенно снижают срок службы объекта [1–4]. Для предотвращения внезапного разрушения, вызванного развитием усталостных дефектов, проводят плановый неразрушающий контроль ручными дефектоскопами, автоматизированными вагонными-дефектоскопами и автомотрисами. Используемые методы и средства дефектоскопии ориентированы на выявление значительных по размерам, критически развитых дефектов [5, 6].

Одной из наиболее частых причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе и рельсов, является высокий уровень остаточных напряжений, которые могут достигать предела текучести, особенно в области дефектов [6, 8]. Остаточные напряжения возникают в процессе производства, при механических и термических нагрузках, в процессе эксплуатации рельса, при сварке. Это приводит к тому, что в вершине трещины некритических размеров появляется концентрация напряжений, которая, суммируясь с остаточными технологическими напряжениями, приводит к ускоренному развитию трещины и существенно сокращает долговечность конструкции [8–11].

Цель работы заключалась в создании модели рельса с учетом термического упрочнения головки и подошвы и сопоставлении результатов моделирования с измерениями, полученными в ходе эксперимента. Знание величины внутренних напряжений в рельсах позволит получить информацию об их техническом состоянии, благодаря чему можно избежать аварийных ситуаций. Направление исследований является особо актуальным в связи с принятой стратегией развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года.

Моделирование расхождения подошвы и головки рельса с разрезом

Технологии изготовления рельсов постоянно совершенствуются, так же как и методы неразрушающего контроля. Новая технология производства рельсов ДТ 350 из непрерывнолитой заготовки согласно ГОСТу 51685-2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия» при приемо-сдаточных испытаниях не допускает остаточных напряжений в шейке, приводящих к расхождению паза на торце полнопрофильной пробы рельса после ее прорезания по центру шейки, превышающему 2,0 мм. Пробу длиной 600 мм прорезают в холодном состоянии по нейтральной оси рельса на длину 400 мм с шириной паза 6 мм.

Используя нормативы ГОСТа 51685-2013 при моделировании напряженно-деформированного состояния рельса, можно получить ориентировочные допустимые значения остаточных напряжений, возникающих в рельсе после его изготовления. Полученные значения могут найти применение при дальнейшей верификации результатов расчета остаточных напряжений, полученных акустопругим методом.

Моделирование осуществлялось в программной среде *COMSOL Multiphysics*. Для проведения моделирования использован подключаемый модуль «Механика твердых тел» с использованием методов конечных элементов и уравнений равновесия всей конечно-элементной модели:

$$[K]\{U\} = \{P\} + \{P\}^q + \{P\}^g,$$

где $[K]$ – общая матрица жесткости конечно-элементной модели; $\{P\}$ – вектор заданных внешних узловых сил; $\{P\}^q$ и $\{P\}^g$ – общие векторы узловых сил, эквивалентных распределенным и массовым силам.

Обозначенное выше расхождение головки и подошвы рельса возникает вследствие возникновения остаточных напряжений при проведении термического упрочнения рельса. Остаточные напряжения в рельсе возникают из-за неравномерного охлаждения рельса и соответственно разной плотности металла в разных элементах рельса. При этом в подошве и головке рельса напряжения носят сжимающий характер, а в шейке

рельса напряжения – растягивающий характер [7, 9, 10].

Для моделирования напряженно-деформированного состояния к подошве и головке рельса были приложены распределенные продольные силы, стремящиеся создать растягивающие напряжения в шейке и сжимающие в подошве и головке рельса (рисунок 1), что приводит к возникновению момента, обуславливающего расхождение паза.

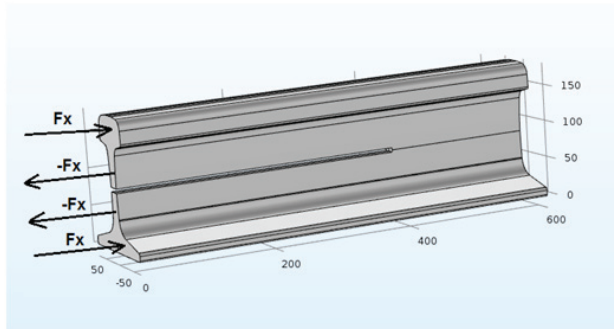


Рисунок 1 – Схематичное распределение приложенных сил

Figure 1 – Scheme of the distribution of applying loads

Ниже в качестве примера представлено распределение смещений точек рельса относительно равновесного состояния при значении расхождения паза 2 мм по вертикали (рисунок 2), что является максимально допустимым согласно ГОСТу 51685-2013. Согласно результатам моделирования данное значение наблюдается при значении силы $F_x = 55$ МН. Обработанные результаты моделирования расхождения паза в зависимости от значения распределенной силы представлены в таблице 1.

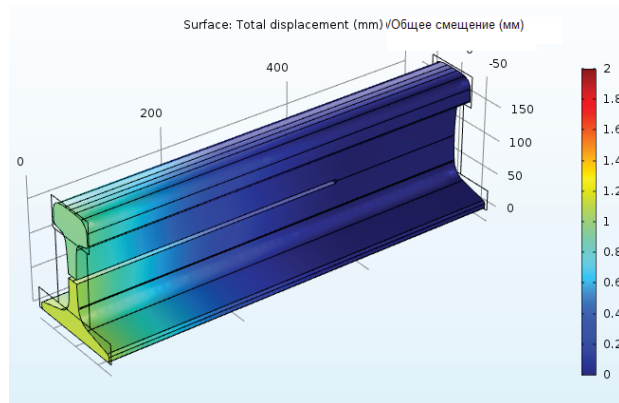


Рисунок 2 – Распределение смещений в рельсе при значении силы 55 МН

Figure 2 – Distribution of the displacements in the rail in case of the value of $F_x = 55$ MN

Таблица 1 / Table 1

Расхождение паза в рельсе при различных значениях силы F_x

Discrepancy of the housing in case of different value of force F_x

F_x , МН/МН	Δz_1 , мм/мм	Δz_2 , мм/мм	Δz_{sum} , мм/мм
5	0,09	0,1	0,19
15	0,25	0,3	0,55
25	0,43	0,5	0,93
35	0,6	0,7	1,3
45	0,77	0,9	1,67
55	0,93	1,11	2,04
65	1,13	1,32	2,45
75	1,29	1,52	2,81
85	1,49	1,74	3,23
95	1,68	1,97	3,65
105	1,85	2,18	4,03

F_x – значение силы, приложенной к элементам рельса согласно схеме, приведенной на рисунке 1; Δz_1 – значение смещения головки рельса по вертикальной оси; Δz_2 – значение смещения подошвы рельса по вертикальной оси; Δz_{sum} – смещение головки рельса относительно подошвы по вертикальной оси (расхождение паза).

Максимально допустимому значению расхождения паза в 2 мм согласно ГОСТу соответствует значение распределенной продольной силы 55 МН.

Результаты моделирование напряженного состояния рельса

Для осуществления моделирования напряженного состояния к рельсу были приложены такие же значения распределенных сил, как и в моделировании расхождения паза. Пример распределения максимальных напряжений при значении силы $F_x = 55$ МН, что соответствует расхождению паза в 2 мм, представлен ниже (рисунок 3).

Примеры графиков распределения напряжений в продольном и вертикальном направлениях приведены на рисунках 4 и 5 соответственно. Результаты моделирования напряжений при значении расхождения паза в 2 мм представлены в таблице 2.

Анализ напряжений, возникающих в рельсе, подтверждает, что напряжения в продольном направлении пропорциональны приложенной силе, носят сжимающий характер для головки и подо-

швы и растягивающий для шейки. Аналогичное распределение можно наблюдать и в вертикальном направлении, однако согласно результатам моделирования напряжения в подошве и головке в данном случае не имеют больших значений в отличие от напряжений в шейке рельса, которые могут достигать больших значений.

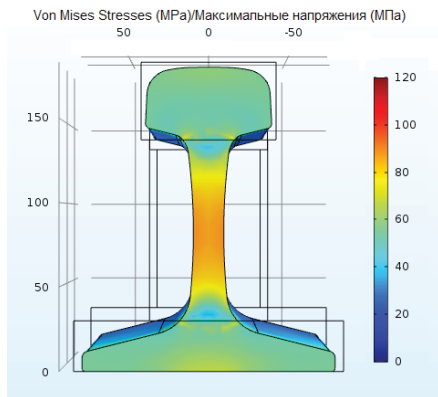


Рисунок 3 – Распределение максимальных напряжений в рельсе при $F_x = 55$ МН

Figure 3 – Distribution of maximum loads in the rail in case of $F_x = 55$ MN

Таблица 2 / Table 2

Напряжения в рельсе при значении расхождения паза 2 мм

Stresses in the rail in case of the 2 mm discrepancy of the housing

Напряжения Stresses	Головка рельса, σ , МПа Top of the rail, σ , MPa	Шейка рельса, σ , МПа Web of the rail, σ , MPa	Подошва рельса, σ , МПа Bottom of the rail, σ , MPa
Максимальные Maximum	–53,5	86,3	–61,9
Продольные Longitudinal	–55,3	53,0	–56,1
Вертикальные Vertical	–12,8	100,1	–9,1

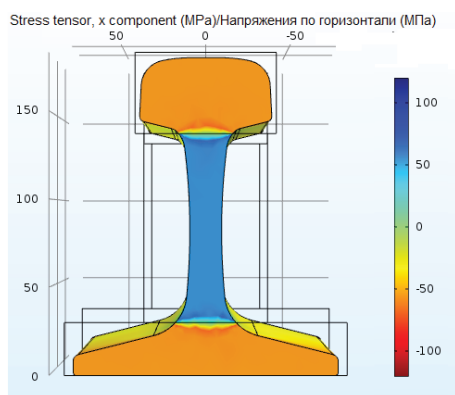


Рисунок 4 – Распределение напряжений в продольном направлении при $F_x = 55$ МН

Figure 4 – Distribution of stresses in longitudinal axis in the rail in case of $F_x = 55$ MN

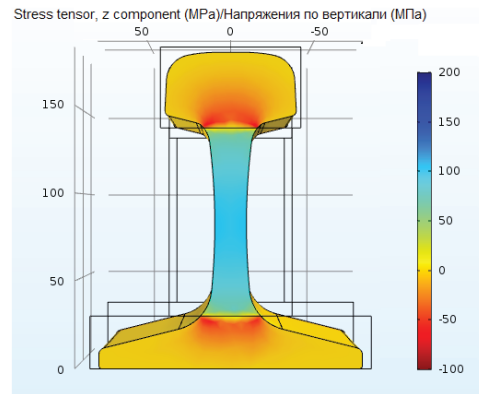


Рисунок 5 – Распределение напряжений в вертикальном направлении при $F_x = 55$ МН

Figure 5 – Distribution of stresses in transverse axis in the rail in case of $F_x = 55$ MN

Производство рельс ведется из сталей марки Э76Ф, имеющей следующие физико-механические характеристики: модуль Юнга $E = 207$ ГПа, предел текучести $\sigma_t = 1080$ МПа. Как видно из таблицы 2, значения напряжений в рельсах значительно ниже предела текучести материала, однако в процессе эксплуатации идет процесс накопления остаточных напряжений, в результате чего напряжения в области дефектов могут достигать предела текучести [5, 6]. Нормирование значений напряжений при производстве рельсов позволяет увеличить срок службы изделий.

Описание методики эксперимента

Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния тел осуществляется различными методами, однако в связи с особенностями конструкции рельсов появляются определенные ограничения, связанные с выбором методики контроля. Одним из наиболее перспективных методов контроля величины остаточных напряжений рельса является акустоупругий метод, успешно применяемый для контроля ободьев железнодорожных колес [10, 12, 13]. Для напряжений, определяемых по данному методу, существует следующая зависимость [6, 10, 12]:

$$\sigma = D \cdot \left(\frac{\pm \Delta t}{t_1} - a_0 \right),$$

где $D = 145$ ГПа – коэффициент упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния, определяемый экспериментально, a_0 – параметр акустической анизотропии материала; Δt – разница между временем распространения

сдвиговых волн, поляризованных в продольном и поперечном направлениях относительно оси рельса в напряженном состоянии, с; t_1 – время распространения сдвиговой волны, поляризованной вдоль главных напряжений, с.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6 [12]. Она включает в себя генератор электрических импульсов 2, формирующий мощный зондирующий электрический импульс в объекте контроля 1, электромагнитно-акустический преобразователь 3, возбуждающий и принимающий короткие акустические импульсы поперечных волн, усилитель 4 и плату АЦП 5, встроенную в ЭВМ, на экране которой отражается осциллограмма отраженных импульсов. Электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь устанавливается на легкодоступную поверхность головки или шейки рельса [6, 14].

Данный метод является перспективным, и потому для проверки полученных результатов возникает необходимость в предварительном моделировании напряженно-деформированного состояния рельсов. Величина остаточных напряжений, как было сказано выше, зависит не только от наработки рельса, но и от технологии изготовления. Несмотря на это, метод проверки остаточных напряжений в рельсе согласно ГОСТу 51685-2013 является универсальным для каждого типа рельс. За информативный параметр в данном методе используется увеличение расстояния между подошвой и головкой рельса при выполнении продольного выреза в рельсе на глубину 600 мм, а не значения напряжений в рельсе, в связи с чем возникает необходимость установить связь между двумя методами посредством проведения моделирования.

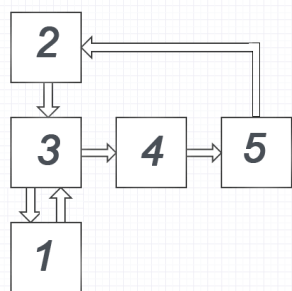


Рисунок 6 – Структурная схема установки: 1 – объект контроля; 2 – генератор; 3 – электромагнитно-акустический преобразователь; 4 – усилитель; 5 – ПК с платой АЦП

Figure 6 – Structural scheme of the device: 1 – Object of control; 2 – generator; 3 – electromagnetic acoustic transducer; 4 – amplifier; 5 – PC with ADC (analog-digital converter)

Экспериментальные значения были получены струтуроскопом СЭМА, в основе которого лежит использование метода акустоупругости. Снятие осциллограмм производилось в программной среде ПРИНЦ [15], обработка полученных осциллограмм производилась в программной среде *Sensitive*, также входящей в пакет регистратора высокочастотных сигналов ПРИНЦ (св-во № 2011614594 от 21.04.2011) Измерения проводились по пяти отрезкам различных рельс, не находившихся в эксплуатации. В качестве результатов моделирования взяты значения, полученные при расхождении паза в 2 мм. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты измерения напряжений в рельсах
Results of measurements of the stresses in the rails

Проба, № / Rail number	Напряжения, МПа/ Stresses, MPa		
	Головка Top	Шейка Web	Подошва Bottom
Расчетные значения Modeling results	–54	86	–62
1 (Эксперимент Experiment)	–48	62	–59
2 (Эксперимент Experiment)	–64	93	–65
3 (Эксперимент Experiment)	–62	54	–72
4 (Эксперимент Experiment)	–62	62	–74
5 (Эксперимент Experiment)	–64	62	–64

Погрешность измерения напряжений составляет около ± 5 МПа, результаты измерений показывают довольно высокий уровень сходства с результатами моделирования. Также экспериментально подтверждается картина распределения напряжений в рельсе (растягивающие напряжения в шейке рельса, сжимающие в головке и подошве рельса).

Заключение

Разработана модель, позволяющая проводить анализ напряжений, возникающих в рельсе и связать эти напряжения с требованиями ГОСТа 51685-2013, где нормирование остаточных напряжений ведется с помощью учета расхождения головки и подошвы рельса. Смоделированы напряжения в рельсе при различном расхождении после прорезания паза в шейке.

Выполнено моделирование деформаций в рельсе после прорезания паза в шейке.

Приведено описание остаточных напряжений: в головке и подошве имеют место сжима-

ющие продольные напряжения, в то время как в шейке рельса характер напряжений растягивающий как в продольном, так и в вертикальном направлении.

Результаты моделирования остаточных напряжений показали совпадение характера распределения напряжений с экспериментально полученными данными по пяти пробам рельсов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00051, 2017).

Список использованных источников

1. Громов, В.Е. Микроструктура закаленных рельсов / В.Е. Громов, А.Б. Юрьев, К.В. Морозов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк : Изд-во «Интер-Кузбасс», 2014. – 213 с.

2. Бехер, С.А. Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации / С.А. Бехер, А.О. Колomeец // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 110–118.

3. Неразрушающий контроль : справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – Т. 4 : в 3 кн. Кн. 1: Акустическая тензометрия / В.А. Анисимов, Б.И. Каторгин, А.Н. Куценко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 736 с.

4. Deputat, J. Experiences in Ultrasonic Measurement of Rail Residual Stresses / O. Orringer [et al.] (eds.); J. Deputat, J. Szelazek, A. Kwaszczynska-Klimek and A. Miernik // Residual Stress in Rails. – Kluwer academic publishers. – 1992. – No. 1. – P. 169–183.

5. Степанова, Л.Н. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л.Н. Степанова, С.А. Бехер, А.Н. Курбатов [и др.]. – Изв. вузов. Строительство. – 2013. – № 7. – С. 103–109.

6. Муравьев, В.В. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, А.В. Платунов, В.А. Куликов // Дефектоскопия. – № 7. – 2016. – С. 12–19.

7. Иванов, Ю.Ф. Формирование структурно-фазовых градиентов в рельсах при длительной эксплуатации / Ю.Ф. Иванов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 3. – С. 59–65.

8. Иванов, Ю.Ф. Эволюция структурно-фазовых состояний рельсов при длительной эксплуатации / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, О.А. Перегудов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 262–267.

9. Покровский, А.М. Численное моделирование температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке / А.М. Покровский, Д.Н. Третьяков // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 7. – С. 1–13.

10. Никитина, Н.Е. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях / Н.Е. Никитина, А.В. Камышев, С.В. Казачек // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 51–60.

11. Whithers, P.J. Overview Residual stress / P.J. Whithers, H.K.H Bhadeshia. Part 1 – Measurement techniques // Material Science and Technology. – 2001. – Vol. 17. – P. 355–365.

12. Бехер, С.А. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах / С.А. Бехер, А.Н. Курбатов, Л.Н. Степанова // Вестник РГУПС. – № 2. – 2013. – С. 104–110.

13. Schneider, E. Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels / E. Schneider, R. Herzer // NDTnet. – June 1998. – Vol. 3, no. 6.

14. Муравьев, В.В. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, В.Е. Громов, А.М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. – С. 34–37.

15. Стрижак, В.А. Информационноизмерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В.А. Стрижак, А.В. Пряхин, С.А. Обухов, А.Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.

Acknowledgments

This research was supported by an Russian Science fond grant (project no. 15-19-00051, 2017).

References

1. Gromov V.E. *Mikrostruktura zakalennykh rel'sov* [Microstructure of hardened rails]. Novokuznetsk, Inter-Kuzbass Publ., 2014, 213 p. (in Russian).

2. Beher S.A., Kolomeec A.O. [Experimental method of measurement of dynamic forces, applied to the rails of the crane in real conditions of using]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of the universities. Construction], 2016, no. 3, pp. 110–118 (in Russian).

3. Kluev V.V., Anisimov V.V., Katorgin B.I., Kucenko A.N. *Nerazrushayushchii kontrol' : spravochnik v 7 t.* [Non-destructive testing: directory in 7 volumes], vol. 4, Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 736 p. (in Russian).

4. Deputat J., Szelazek J., Kwaszczynska-Klimek A. and Miernik A. Experiences in Ultrasonic Measurement of

Rail Residual Stresses. O. Orringer et al. (eds.). *Residual Stress in Rails*, Kluwer academic publishers, 1992, no. 1, pp. 169–183.

5. Stepanova L.N., Beher S.A., Kurbatov A.N. [Research of strain-stress state of the rail by acoustoelasticity and tensometry]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of the universities. Construction], 2013, no. 7, pp 103–109 (in Russian).

6. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V. and Kulikov V.A. An Electromagnetic-Acoustic Method for Studying Stress-Strain States of Rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 7, pp. 370–376.

7. Ivanov U.F., Morozov K.V., Peregudov O.A. [Developing of structural-phase gradients in rails during long time use]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya* [Problems of iron metallurgy and material science], 2015, no. 3, pp. 59–65 (in Russian).

8. Ivanov U.F., Gromov V.E., Peregudov O.A. [Evolution of structural-phase states of the rails in process of long time using]. *Izvestiya vishih uchebnykh zavedenij. Chernaya Metallurgia* [Messenger of universities. Iron industry], 2015, vol. 58, no. 4, pp. 262–267 (in Russian).

9. Pokrovsky A.M., Tretyakov D.N. [Numerical Modeling of temperature and structural state of rail during its hardening]. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron. zhurn.* [Science and education

of Bauman MSTU. Electronic magazine], 2015, no. 7, pp. 1–13 (in Russian).

10. Nikitina N.E., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. [Applying acoustoelastic method for calculating stresses in anisotropic tube steels]. *Defektoskopia* [Defectoscopy], 2015, no. 3, pp. 51–60 (in Russian).

11. Whithers P.J. Bhadeshia and H.K.H. Overview Residual stress. Part 1 – Measurement techniques, *Material Science and Technology*, 2001, no. 17, pp. 355–365. doi: 10.1179/026708301101509980

12. Beher S.A., Kurbatov A.N., Stepanova L.N. [Using acoustoelastic effect during research mechanic stresses in rails]. *Vestnik RGUPS* [Messenger of RGUPS], no. 2, 2013, pp. 104–110 (in Russian).

13. Schneider E., Herzer R. Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels. *NDTnet*, June 1998, vol. 3, no. 6.

14. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Estimation of the Residual Stresses in Rails Using Electromagnetic-Acoustic Introduction-Reception of Waves. *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2016, no. 10, pp. 1002–1005. doi: 10.1134/S003602951610013X

15. Strizhak V.A., Pryahin A.V., Obuhov S.A., Efremov A.B. [Information measurement system of exciting, receiving, registering and processing of electromagnetic acoustic transducer signals]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligence systems in production], 2011, no. 1, pp. 243–250 (in Russian).

Research of Digital Camera Dynamic Range on the Imaging Processing Basis

Sutkowski M.¹, Saukova Ya.²

¹Institute of Microelectronics and Optoelectronics, Warsaw University of Technology,
15/19 Nowowiejska Str., Warsaw 00-665, Poland

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 02.02.2017

Accepted for publication 23.08.2017

Abstract

Digital images provide to determine photometric and colorimetric properties of objects subject to validation all elements of a measuring channel (digital camera, software, display) and solve the problem of their limited dynamic ranges. The aim of the study was to explore the dynamic range of a digital camera for use in photometric and colorimetric measurements.

The Laboratory of Photonics at the Institute of Microelectronics and Optoelectronics (Warsaw Technical University, Poland) conducted a comparative experiment to determine the threshold of sensitivity, linearity and range of application the digital camera. Color target sets with certified brightness and chromaticity were created at the terminals and recorded with a digital camera with different exposure times. The authors propose a method to extend the dynamic range of a digital camera for red, green and blue color channel of intensities by pairing the calibration dependencies, and determine the true brightness and color of a point on the object by calculation.

Calibration dependencies (triads) of digital camera for red, green and blue color channels intensities were constructed. These dependences allow determining lower and upper bounds of the dynamic range. Each triad has a form of the hysteresis loop. The experiment showed that the accuracy of this method is $\pm 3-5\%$.

Keywords: digital camera, dynamic range, imaging.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

Адрес для переписки:

Савкова Е.Н.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Address for correspondence:

Saukova Ya.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Для цитирования:

Sutkowski M., Saukova Ya.
Research of digital camera dynamic range on the imaging processing basis.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

For citation:

Sutkowski M., Saukova Ya.
[Research of Digital Camera Dynamic Range on the Imaging Processing Basis].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 271–278.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

Исследование динамического диапазона цифровой камеры на основе технологий обработки цифровых изображений

Сутковский М.¹, Савкова Е.Н.²

¹Институт микроэлектроники и оптоэлектроники, Варшавский политехнический университет,
ул. Нововойская 15/19, Варшава 00-665, Польша

²Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 02.02.2017

Принята к печати 23.08.2017

Цифровые изображения позволяют определять фотометрические и колориметрические свойства объектов при условии валидации всех элементов измерительного канала (цифровой камеры, программного обеспечения, дисплея) и решения проблемы ограничения их динамических диапазонов. Целью работы являлось исследование динамического диапазона цифровой камеры для ее дальнейшего использования в фотометрических и колориметрических измерениях.

Лаборатория фотоники в Институте микроэлектроники и оптоэлектроники (Варшавский технический университет, Польша) проводила сличительный эксперимент для определения порога чувствительности, линейности и диапазона применения цифровой камеры. Цветовые мишени были созданы на дисплее в виде аттестованных цветовых однородных полей и регистрировались с помощью цифровой камеры с пошагово увеличивающимся временем экспозиции, а затем осуществлялась обработка изображений и калибровка камеры в красном, зеленом и синем цветовых каналах для получения калибровочных зависимостей. Авторами предложен метод расширения динамического диапазона цифровой камеры для красного, зеленого и синего цветовых каналов интенсивностей посредством сопряжения градуировочных зависимостей и определения истинной яркости точки на объекте расчетным путем.

Полученные калибровочные зависимости (триады) имели форму петли гистерезиса и позволили расчетным путем расширить динамический диапазон. Эксперименты показали, что точность данного метода составляет $\pm 3\text{--}5\%$.

Ключевые слова: цифровая камера, диапазон, обработка изображений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

Адрес для переписки:

Савкова Е.Н.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Address for correspondence:

Saukova Ya.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: evgeniya-savkova@yandex.ru

Для цитирования:

Sutkowski M., Saukova Ya.
Research of digital camera dynamic range on the imaging processing basis.

Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 271–278.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

For citation:

Sutkowski M., Saukova Ya.
[Research of Digital Camera Dynamic Range on the Imaging Processing Basis].

Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 271–278.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278

Introduction

Professional and semi-professional digital cameras including thermal imagers can be used as the universal receivers of photonic information generally in visible range. At the same time the current level of digital technology provides opportunities to apply digital cameras during the control and diagnostics of objects at all stages of their life cycle. Since the characteristics of the cameras are not the object of obligatory acknowledgement of conformity manufacturers may indicate exaggerated values. Therefore the need arises to obtain reliable and accurate results of control and testing. As it is known digital cameras have limited dynamic range to reproduce the intensity (about 60 dB) while it is necessary to record the brightness over a wider range. Standard methods for solving this problem are based on the dynamic range compression of the plots.

Currently compression procedures are used to reproduce image details that are situated in the region closed to the saturation matrix photodetector [1]. So it is necessary to move the point A into the region of the inflection of light characteristics of the signal, which produces a brighter light for compressing the amplitude (interval E_1 – E_2 , Figure 1a). The point A limits a dynamic range of a camera. A linear dependence of $U_{out}(E)$ is modified by reducing the slope of the transfer characteristics in the upper part. Inflection points and slope angle affect the light flux of the brightest objects.

Therefore, the possibility exists to compress the excess dynamic range (bright areas don't merge) reducing the slope of the transfer characteristics. Also the nonlinear compression can be applied. It is necessary to make a plot with the non-linear inflection point in the transition mode overload more smoothly (Figure 1b). In this case, the slope of characteristics varies in proportion to the number of parts of the light phase that would be detected. Also more careful study of details in blown highlights can be achieved by shifting the point of inflection at a constant pole tilt, keeping the signal from vivid seats below the limitation level (Figure 1c). These methods allow only a subjective improve the reproduction of bright details of the image. However, when it is necessary to determine illuminance (brightness) in different points of the object simultaneously a principally new approach is needed.

Aspects of cameras range compression are discussed in [2] and [3]. Contrast extension leads to a «splitting» of quantization levels that appear in

the histogram as a comb. The combined method of dynamic range controlling by software tools in [4] is described. The method is based on the dynamic range stretching in dark areas and compression in the blown highlights area of image. However these technologies are used only for visual improvement of images quality and don't allow determining the intensity significantly. They consider the patterns and effects of visual perceptions such as light and color adaptation, the contrast and the contours of fine details etc. [5, 6].

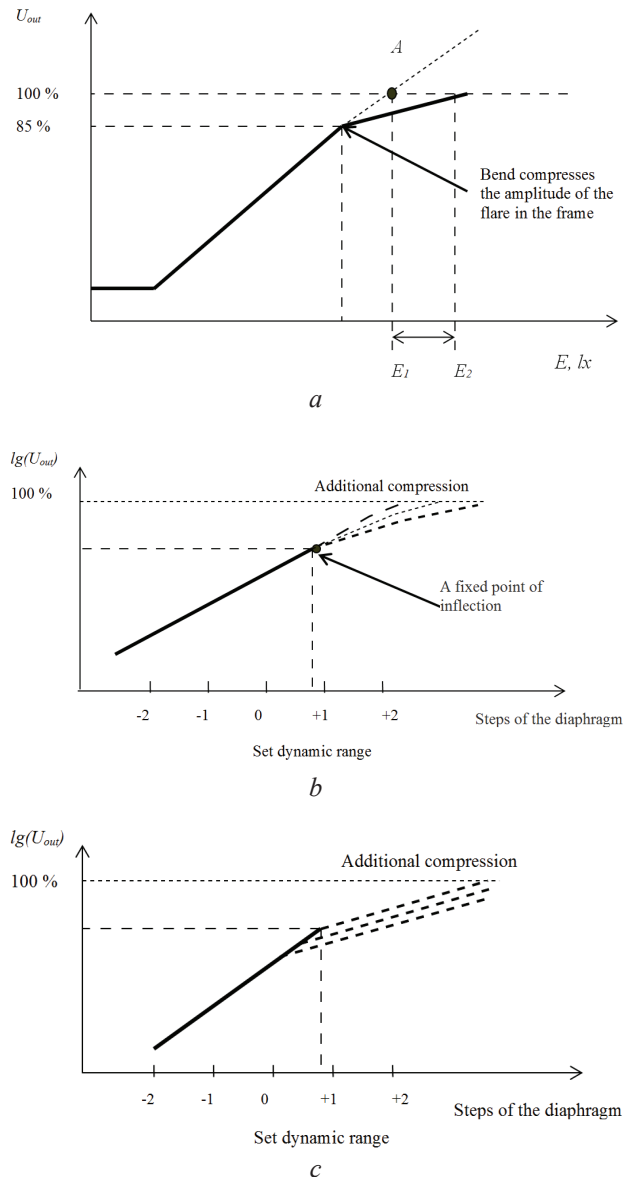


Figure 1 – Electronic methods of dynamic range compression: *a* – linear compression with the displacement of the point of saturation down; *b* – nonlinear compression after the inflection point for different contrast; *c* – options linear compression with the same contrast

This method is based on repeated digital regarding of extended objects and digital images

processing. The brightness of the investigated area of the digital image is compared with the brightness of the certified sources available in the long term picture. The problem of determining the illumination at the object is solved by expanding the dynamic range of optical measurement software. The method developed in the Scientific Research Laboratory of optics and electronics instrument making (Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus) [7] and tested in the Laboratory of Photonics of the Institute of Optoelectronics and Microelectronics (Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland) allows doing photometric measurements in real time with the specified characteristics error. The main idea of this method is to do series of digital images of the same object and reference samples with different exposures and process the images in RGB and RAW formats. Format RGB provides the ability to define intensity in red, green, and blue color channels of images [8]. There are different technologies of objects multiple registrations with increasing the time of exposure for creating of HRDI images [9, 10]. But they apply in computer games and design. And the technology which is described provides an op-

portunity to obtain quantitative data of photometric and colorimetric parameters of the object.

The experimental research of a digital camera dynamic range

To ensure metrological traceability the sets of achromatic and chromatic samples were done on the colorimetric and calibrated display (look Table). The values was applied as five different values represented in standard 8-bit digital number. The samples were then characterized by use of spectrophotometer as real photometric values. The readings were done for 3 different areas and then were averaged. In the Figure 2 there are shown chromacity values of the samples (x, y) plotted on the CIE 1931 chart.

Imaging system callibration procedure is necessary to know real lighting parameters of the examined area of the light panel. The real photometric parameters was determined by Minolta CS-100A non-contact chroma meter. Each measurement was achieved by averaging of three readings done at three neighbouring points of the examined area of the panel. Every measurement was done not more than 10 s after respective image acquisition (see further paragraph).

Table

Measured photometric values of the total 17 samples: Y – luminance, x, y – chrominance

	Displayed sample values		Gray (Gr)				R				G				B		
			Y	x	y		Y	x	y		Y	x	y		Y	x	y
1	R	0	0,17	0,2527	0,3527	0	X			0	X			0	X		
	G	0				0				0							
	B	0				0				0							
2	R	64	11,00	0,3207	0,3437	64	2,93	0,6040	0,3527	0	8,02	0,3220	0,5833	0	1,49	0,1433	0,0600
	G	64				0				64							
	B	64				0				64							
3	R	128	31,43	0,3217	0,3467	128	9,05	0,6190	0,3490	0	25,77	0,3333	0,5810	0	2,48	0,1423	0,0620
	G	128				0				128							
	B	128				0				128							
4	R	196	74,23	0,3240	0,3437	196	19,20	0,6217	0,3497	0	53,77	0,3347	0,5813	0	5,66	0,1443	0,0670
	G	196				0				196							
	B	196				0				196							
5	R	255	121,00	0,3233	0,3437	255	31,40	0,6210	0,3520	0	88,03	0,3343	0,5813	0	9,73	0,1453	0,0713
	G	255				0				255							
	B	255				0				255							

The hardware set-up of the measuring system proposed in this paper is targeted to propose portable and flexible color measurement system. It assumes to use the best possible commercially available image acquisition system with best possible image quality. For measuring application it should offer possibility to control all steps of the image registration procedure, including flexible and fully controlled image data processing. The next assumption is to use area sensor instead of widely used spot measurement units. It should can work quite everywhere, even there where en-

vironmental conditions eliminates use of specialized spectrophotometers. Fullfilling these factors we can offer a system which allow to examine light panels or large illuminating surfaces comprehensively. Regarding to mentioned reasons we decided to use commercial photographic camera with high-quality imaging sensor as the image acquisition unit. The characterization of the imaging hardware for measurement requirements is highly needed. Also we have to use image processing and analysis without (or as low as possible) influence on the data taken by the sensor.

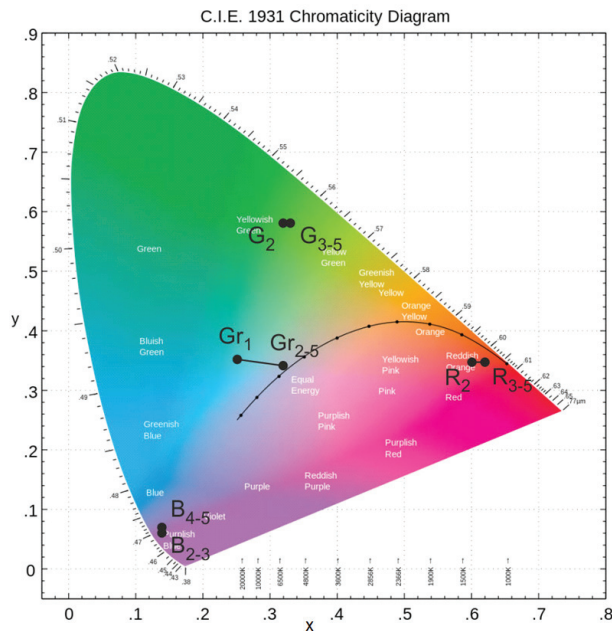


Figure 2 – Chromaticity values of the samples used in the experiment plotted on the CIE 1931 graph. The luminosity is omitted

As the acquisition unit a Nikon D610 camera was chosen. It has a CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) large area imaging sensor offering active area of $35,9 \times 24$ mm and total pixel count 24,7 million. It is equipped with standard color filter array of Bayer RGB type. The imaging data can be represented as a digital number with 14-bit depth. The final image can be recorded at resolution of 6016×4016 pixels [<http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d610/spec.htm>]. It works with standard imaging lens AF-S Nikkor 24-85mm f/3,5–4,5G ED VR. It offers maximum aperture of f/3,5 at $f = 24$ mm and f/4,5 at 85 mm. Its optical construction consists of 16 optical elements in 11 groups including 1 ED (low dispersion) glass and 3 aspherical lens elements. This lens was chosen due to the very good response at the center of the image. Its MTF (modulation transfer function) curves show near perfect characteristics for low spatial frequencies (10 l/mm for both tangential and sagittal lines) at the circle with 10 mm diameter. It has very flat characteristic which minimum value is approx. 0,98 [http://imaging.nikon.com/lineup/lens/zoom/normalzoom/af-s_24-85mmf_35-45g_ed_vr/index.htm].

The goal of the present experiment is to find an answer of the camera for different exposure values to find a linear part of the registration curve. To perform these tests a reference light panel is needed. In practice the light parameters of the image applied to the reference panel utilized for these measurements has

to be well known. As a reference light panel a colorimetric wide gamut LCD monitor was used, in detail Eizo ColorEdge CG245W offering 100 % of sRGB space coverage. It was driven by AMD HD6990 graphic card with correction LUT applied. It is achieved by color calibration procedure with use of datacolor Spyder 3 Elite callibrator. For the tests we used only a small part of the panel at the center to avoid (or minimalise) any angular dependancies and backlight illumination non-uniformity. Measured area had a dimensions of approx. 100×100 mm.

Measuring set-up is shown on Figure 3. Object distance was fixed at the value of 700 mm, optical axis was perpendicular to the panel plane. Imaging lens was set to the focal distance $f = 50$ mm and middle aperture f/8. The acquired images were saved as a NED (RAW-type) file with 14-bit depth. All in-camera processing was omitted and conversion to tri-chromatic form (demosaicing) was performed with «zero» parameters in commercial Adobe Lightroom 4.4 software. The signal amplification in camera was set to equivalent of ISO 100. Exposure was measured for middle-gray (128, 128, 128) values and corresponds to exposure time $t = 1/4$ s. The experiment consists of series exposures within the range of relative EV from -5 to $+4$ with step of $1/3$ what corresponds exposure time range from $1/125$ to 4 s.

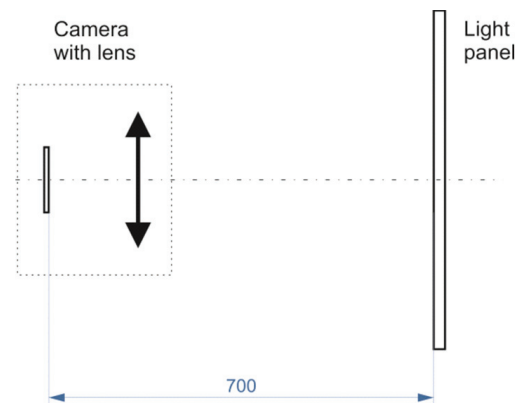


Figure 3 – Experimental set-up for characterization of the digital camera

The goal of the experiment was to determine linear part of the camera characteristic. The target was changed in luminosity and in chromaticity in five steps from value 0 to 255 (noted as Gr for theoretically neutral grays, R, G, B – for the basic red, green, blue chroma respectively and numbered from 1 to 5 – as in the Table 1). For each constant target the series of vary exposure is done. Acquired image was converted with use of Adobe Camera RAW from raw data (a 14-bit uncompressed NEF file saved by the camera) to tri-chromatic form and

saved as 16-bit TIFF file. Measurements of the image parameters was done by Image J software after cropping of the ROI (Region Of Interest) with the size 585×585 pixels at the center of the image.

As result an averaged luminance values of the pixels in three channels are taken. The experimental results are shown oh Figure 4 for gray channel (Gr), R, G, B channels respectively.

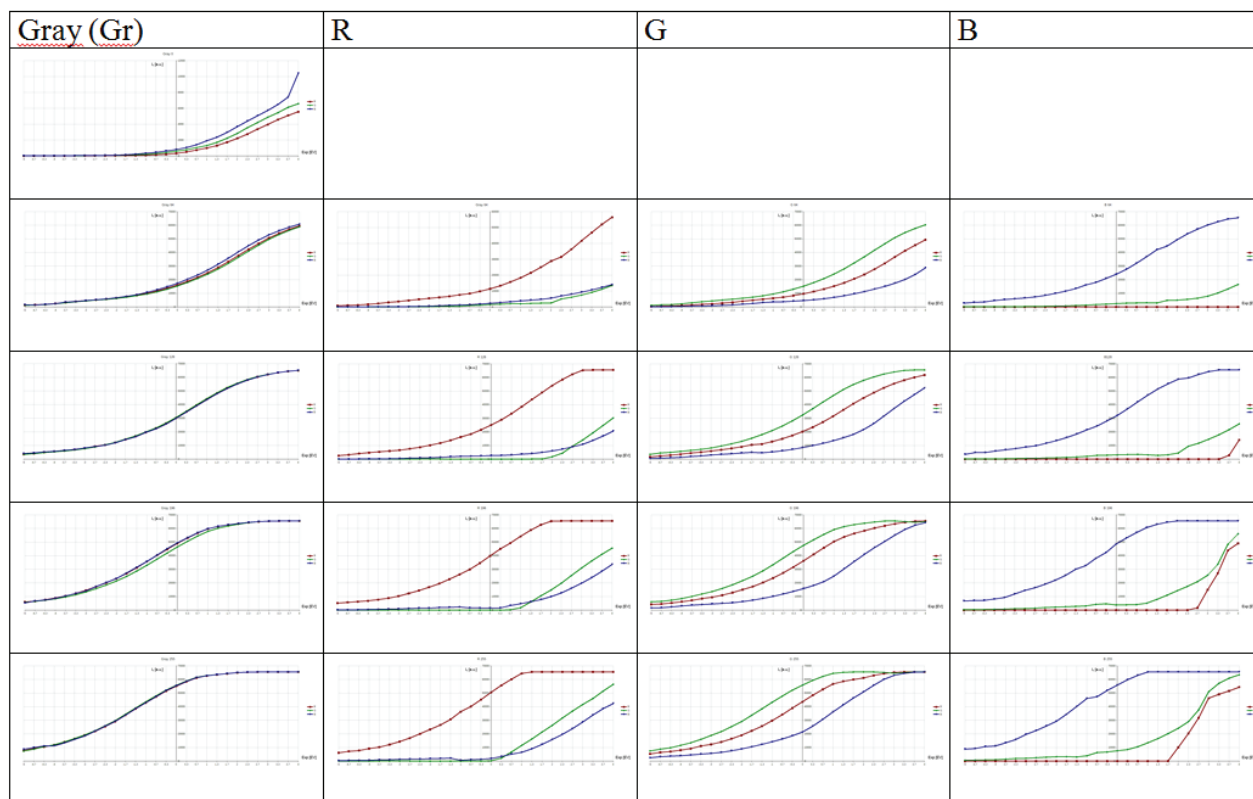


Figure 4 – Experimental curves of the digital camera range obtained by recording the self-luminous objects with different exposure time: red colour – R; green – G; blue – B

The figure 4 shows that the triad of characteristic dependences have the shape of the hysteresis loop. Every dependence is not necessarily linear within the active range area. Dependences have different angles of inclination.

The basic concept of measurements

In information systems the process of data conversion assumes the operations of filtering, sampling, quantization, encoding, decoding, postfiltration etc. For realization of measurements it is necessary to adhere to the principle of comparison with a measure. This is a difficult task because there are many difficulties with ensuring of the metrological traceability of results, given the diversity of hardware and software, as well as the use of computer ranking scales for the measurement of the intensities of digital images. In addition, the differences and limitations of transmitting devices gamuts prevent the obtaining of reliable measuring information. There are many difficulties arise in solving measurement problems associated with determining the luminance and color characteristics of objects based on processing their

digital images. These difficulties are associated with objective limitations of color coverage, and almost all economic ranges of the transmission device, and establishing the corresponding nominal level of quantization in the color channels as a result of the normalization of the digital image at the brightest point. These problems can be solved by the correct application of available hardware and software according to the proposed method of measurements. The proposed method is based on digital registration of standard objects with different values of exposure time and digital images processing. The metrological traceability of measurement results is provided by reference to the initial samples (called by authors as a line sources with equal brightness) which are non-point sources of light acting as the measures in measurements [2]. Within each of the line light sources should vary in brightness with a step depending on the specific measuring task. Thus we can construct a set of calibration dependencies for each source showing the dependence of numerical representation of intensity values (y-axis) of the color channels from the exposure H (x-axis) – $R(t)$, $G(t)$, $B(t)$, an example of which is given in Figure 5 [3]. Further accord-

ing to mated for each consecutive pairs of sources for example one line for the one time. The values of intensities of R , G , B for exposure H pending solid lines in the figure on the y -axis. The exposure H is understand as a product of incident beam intensity and the exposure time (time when photon interact with the imager structure):

$$H_y = I \cdot t_{\text{exp}}, \quad (1)$$

where I – denotes intensity of the photon beam incident onto imager; t_{exp} – denotes exposure time.

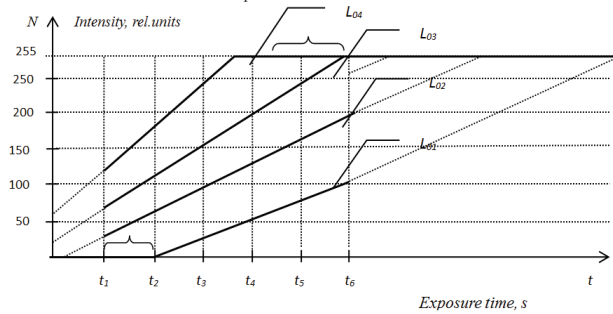


Figure 5 – The theoretical calibration curves of digital images color channels

As can be seen in Figure 5, in the red channel, the intensity of R_n lies in the region of saturation. This is due to limitations in the dynamic ranges of imagers of digital cameras and therefore, makes it impossible to obtain valid measurement information. The offset of intensity in the green channel G_{01} in the area of imager's noise may occur when switching to the image with very low exposure level. Therefore to base on the principle of linearity of the calibration characteristics of the measurement method we can determine on the y -axis conditional point R'_n outside physical dynamic range and carry out the normalization of the intensities of R , G , B , adapting them to new values, introducing appropriate broadening coefficients directly in a standardized model transformation color spaces $RGB \rightarrow XYZ$ [4]:

$$X = \frac{a_{11}}{k_R} R + \frac{a_{12}}{k_G} G + \frac{a_{13}}{k_B} B, \quad (2)$$

$$Y = \frac{a_{21}}{k_R} R + \frac{a_{22}}{k_G} G + \frac{a_{23}}{k_B} B, \quad (3)$$

$$Z = \frac{a_{31}}{k_R} R + \frac{a_{32}}{k_G} G + \frac{a_{33}}{k_B} B, \quad (4)$$

where X , Y , Z – coordinates of the color space XYZ ; a_{nm} – the standardized weighting of intensities R , G , B , k_R , k_G , k_B – expanding the coefficients calculated by the formulas [4]:

$$k_R = \frac{R'}{255}, \quad k_G = \frac{G'}{255}, \quad k_B = \frac{B'}{255}. \quad (5)$$

The highest value of the digital intensity image is given in the denominators. It is dependant on the actual digital quantization level, the highest number is represented by the 2^n where n is the number of bits used. There is 255 gradations of intensity in the case of 8-bit digital representation. New transformed lines of intensity in the color channel and G are shown in Figure 6 by the stipple, but at the saturation level all data is lost. The calculations of the chromaticity coordinates produced by the formulas (2)–(4). Thus it was established experimentally that color coordinates triads of the same reference point on the object in images made with different exposures with a given confidence level correspond to the same chroma. If at least one channel reach its saturation level we can predict linear continuity of the constant chroma value and to make reading over this level. It was also found that the greatest variance of the intensity values observed in the blue channel. The averaged variance of determination of chromaticity coordinates is from 2.8 to 3.1 units approximately. Reliable detection of object real color coordinates depends on the nominal values of quantization steps, playing required scales conventional digital image. The nominal level of quantization represent the ellipsoids of different volumes in three-dimensional color spaces, and the minimum (definitely) uncertainty ellipses is determined by the Mac-Adam [5]. However the constant value of the nominal level of quantization can be maintained in the RGB color space by the mathematical methods of the increment intensity. There is a possibility to define the color characteristics of self-luminous objects and to enter correction factors for secondary emitters by applying models of chromatic adaptation Von-Crease, CIECAM02, Fairchild and others [5, 6].

Data conversion must be performed for each color channel. It should be consider surface properties (reflectance) and parameters of shooting in the calculations. The Figure 6 explains the essence of the developed model. Different signals N'_{01} , N'_{02} , N''_{01} , N''_{02} , etc. correspond to the reference brightness values L_1 , L_2 on the abscissa. The linear dependences can be built on control points of the photodetector dynamic range before the transition to the stage of saturation. By pairing the dependency mathematically with sufficient accuracy for practice it is possible to calculate intensity values of points on the object in three color channels, thus broadening the range of two-dimensional colorimetric measurements.

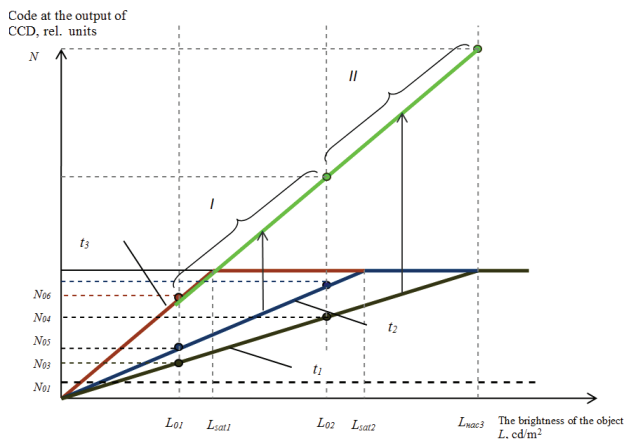


Figure 6 – The extension of detected brightness dynamic range of the images made with different exposures (different exposure time: $t_1 < t_2 < t_3$ when other parameters are constant)

The goal of the experiment was to study characteristics of the digital cameras dynamic range for their validation in the information channel. Lower and upper limits of the range, the linearity of color channels were studied during the experiment. The experiment plan included the following stages:

- 1) to do the sets of standard sources (achromatic and chromatic samples) on the display;
- 2) to measure the brightness and color settings of samples with the help of spectrophotometer;
- 3) to take digital images of samples with different exposure times;
- 4) to do image processing for determination the intensities in RGB channels and the chromaticity coordinates;
- 5) to obtain the dependences (calibration characteristics of camera);
- 6) to investigate the characteristics of dynamic range.

Conclusion

1. The resulting diagrams (curves) are representing the characteristic of the registration unit (a camera with the lens). Each registration curve has a linear section where the aerial measurements are possible.
2. General shape of the registration curve show strong nonlinearity where it cannot be calibrated for measurements.
3. The chroma responses of the camera shows significant differences in spectral characteristics of the RGB Bayer filters used in the image detector of the camera in comparison to reference values (measured by chroma meter).
4. On the B channel there are some errors on the

curve visible. This is due to the very low level of luminance of the blue image displayed on the monitor used in this experiment.

5. With use of aerial sensor we can make averaging measurements of the area light panels or to measure few different sources simultaneously.

6. Due to the possibility of exposure adjustments we can offer a very wide range of light intensity measurements.

7. In the paper the dedicated demosaicing process for the camera we used is omitted. When applied it can allow to produce more precise results and the chroma response of the camera can be calibrated with use of reference source.

This technology can be used as a basis for calibration and validation methods of cameras, displays and other controlled objects too.

References

1. Ward P. Working with digital cameras: lessons learned operator skills. Moscow, Mir Publ., 2001, 301 p. (in Russian).
2. Lynch R. The Usage of Adobe Photoshop 6. Special edition, Moscow, Publishing house «Williams», 2001, 880 p. (in Russian).
3. Reihard E., Ashikhmin M., Gooch B. and Shirley P. «Colour Transfer between Images». *YIEEE Computer Graphics and Application, Appied perception*, September/October 2001, pp. 34–41.
4. Goden J. Colorimetric in the rendering performance. Moscow, Technosphere Publ., 2008, 328 p. (in Russian).
5. Rudakov P.I., Safonov V.I. Processing of signals and images. MATLAB 5x. Moscow, Technosphere Publ., 1998, 503 p. (in Russian).
6. Margulis D. Photoshop for professionals. Minsk, Popurry Publ., 1999, 304 p. (in Russian).
7. Zuikov I., Saukova Y. The Method of measuring the intensity of the light source. Patent G 01 J 1/00 By 10453. Application № a20051233/ Registered in the State register.
8. Süssstrunk S., Buckley R., Swen St. Standard RGB Color Spaces. Laboratory of audio-visual Communication (EPFL), Xerox Architecture Center, Apple Computer Lausanne, Switzerland; Webster, NY; Cupertino, CA. Available at: <https://infoscience.epfl.ch/record/34089/files/SusstrunkBS99.pdf>
9. Starovoitov V. V., Golub Yu. I. Digital image, from receipt to processing. Minsk, United Institute of Informatics problems, National Academy of Sciences of Belarus, 2014, 202 p. (in Russian).
10. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Digital video information systems (Theory and Practice), Moscow, Technosphere Publ., 2012, 1008 p. (in Russian).

УДК 53.089.62; 519.245; 539.125.52

Метрологическое обеспечение дозиметрии гамма-излучения с энергией до 10 МэВ для приборов радиационной защиты

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

¹НПУП «АТОМТЕХ»,

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

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,

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

Поступила 18.07.2017

Принята к печати 21.08.2017

Поле высокоэнергетического захватного гамма-излучения для калибровки приборов радиационной защиты можно получить в результате захвата тепловых нейтронов на мишенях из титана (до 7 МэВ) и никеля (до 10 МэВ). Целью данной работы являлось исследование полей захватного гамма-излучения от мишеней из титана и никеля, полученных с использованием облучателя поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140 для обеспечения дозиметрии до 10 МэВ.

В ходе работы определены энергетические интервалы, в которых можно калибровать дозиметрические приборы с учетом сопутствующего выходу нейтронов источника ²³⁸PuBe гамма-излучения захватного излучения материалов коллиматора и захватного излучения от мишеней.

Для измерения мощности кермы в воздухе гамма-излучения использовался эталонный дозиметр ДКС-АТ5350 с ионизационной камерой ТМ32002. С помощью Монте-Карло моделирования получено энергетическое распределение мощности кермы в воздухе для мишеней. Установлены геометрические размеры равномерного поля и интервал рабочих расстояний установки.

Исследованы характеристики полей захватного излучения от мишеней из титана и никеля, полученных на поверочной установке нейтронного излучения УПН-АТ140 с целью метрологического обеспечения дозиметрических приборов радиационной защиты. Показана возможность проведения калибровки дозиметрических приборов в таких полях в расширенном энергетическом диапазоне до 10 МэВ.

Ключевые слова: контейнер-коллиматор с тепловой вставкой, поле захватного гамма-излучения, мощность кермы в воздухе, мишень из титана, мишень из никеля.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

Адрес для переписки:

Комар Д.И.

НПУП «АТОМТЕХ»,

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

e-mail: damiankomar@yandex.ru

Address for correspondence:

Komar D.

SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

e-mail: damiankomar@yandex.ru

Для цитирования:

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

Метрологическое обеспечение дозиметрии гамма-излучения с энергией до 10 МэВ для приборов радиационной защиты.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 3. С. 279–285.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

For citation:

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

[Metrological Support of Dosimetry Gamma-Ray with Energy to 10 MeV for Radiation Protection Devices].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

Metrological Support of Dosimetry Gamma-Ray with Energy to 10 MeV for Radiation Protection Devices

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

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

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

Received 18.07.2017

Accepted for publication 21.08.2017

Abstract

The field of high-energy gamma-ray for the calibration of radiation protection devices can be obtained by capturing thermal neutrons from titanium target (to 7 MeV) and nickel target (to 10 MeV). The aim of this work was to determine the metrological characteristics of capture gamma-ray fields from titanium target and nickel target obtained at the AT140 Neutron Calibration Facility to provide dosimetry up to 10 MeV.

We have chosen energy intervals in which we can calibrate dosimetry devices taking into account the accompanying generation of gamma-ray neutrons by the fast neutron source ²³⁸PuBe, the capture radiation of collimator materials and capture radiation from targets.

We measured air kerma rate with the aid of the reference AT5350 dosimeter with the ionization chamber TM32002. Using the Monte-Carlo simulation, we obtained the energy distribution of the air kerma rate for targets. We determined the geometric dimensions of the uniform field and the interval of operating distances of the facility.

We investigated the metrological characteristics of capture gamma-ray fields from titanium target and nickel target obtained at the AT140 Neutron Calibration Facility for dosimetric radiation protection devices. We showed that in such fields it is possible to calibrate dosimetry devices in the extended energy range up to 10 MeV.

Keywords: thermal neutrons collimator, neutron capture gamma-ray, air kerma rate, titanium target, nickel target.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

Комар Д.И., Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кутень С.А.
Метрологическое обеспечение дозиметрии гамма-излучения с энергией до 10 МэВ для приборов радиационной защиты.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 279–285.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

For citation:

Komar D., Lukashevich R., Guzov V., Kutsen S.
[Metrological Support of Dosimetry Gamma-Ray with Energy to 10 MeV for Radiation Protection Devices].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-279-285

Введение

В соответствии с требованиями международных стандартов МЭК для приборов радиационного мониторинга окружающей среды вокруг АЭС должен быть определен энергетический диапазон до 7 МэВ¹. Это требование обусловлено гамма-излучением от ядерной реакции $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$, протекающей в водном охлаждательном контуре с энергией 6,13 МэВ [1, 2]. Требования МЭК по расширению энергетического диапазона измерения мощности дозы до 10 МэВ распространяются к дозиметрам и мониторам для использования на рабочем месте персонала и во время аварийных ситуаций². В своем большинстве спектрометрическая и дозиметрическая аппаратура проходит калибровку по образцовым спектрометрическим гамма-источникам (ОСГИ) до 3 МэВ (^{228}Th 2,614 МэВ). Энергетический диапазон измерений может быть расширен при комбинировании спектрометрического блока детектирования (например, с кристаллом NaI(Tl) или $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$) и ионизационной камеры, которая имеет практически постоянную энергетическую зависимость в широком диапазоне энергий [3]. Рекомендации по расширению энергетического диапазона высокочувствительных дозиметров для измерения мощности кермы в воздухе в диапазоне от 30 нГр/ч до 30 мкГр/ч и мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в диапазоне от 30 нЗв/ч до 30 мкЗв/ч до 7 МэВ также прописаны в стандартах МЭК³.

В соответствии с государственной поверочной схемой для эталонных измерений используются радионуклиды ^{137}Cs (0,662 МэВ) и ^{60}Co (1,250 МэВ). Калибровка и поверка ядерно-физической аппаратуры в полях с энергиями более 3 МэВ в настоящее время не осуществляется.

Поля гамма-излучения с более высокими ($E > 3$ МэВ) энергиями, пригодные для калибровки приборов, получают с помощью ядерных реакций. Такой способ формирования эталонных калибровочных полей требует значительного количества дорогостоящего лабораторного оборудования, которое доступно нескольким ведущим национальным институтам [4, 5].

Формирование поля при помощи ускорительной техники сопряжено со многими трудностями. В первую очередь это высокая стоимость аппаратуры и обслуживания, сложности в эксплуатации, необходимость в квалифицированных кадрах, требования по радиационной безопасности. На ускорителях частиц сложно получить низкие (до 30 мкГр/ч) загрузки по мощности кермы в воздухе, кроме того, не все приборы могут работать в полях импульсного излучения.

Интересной представляется возможность использования поверочной установки нейтронного излучения с радионуклидным источником быстрых нейтронов ($^{238}\text{PuBe}$, ^{252}Cf и др.) для получения поля захватного гамма-излучения с энергией до 10 МэВ. Такая возможность реализована на установке УПН-АТ140 производства УП «АТОМТЕХ» с $^{238}\text{PuBe}$ источником нейтронов ИБН-8-6 ($1,91 \cdot 10^7$ нейтр.с⁻¹). Контейнер-коллиматор с тепловой вставкой формирует коллимированный пучок со значительной составляющей (более 25 %) нейтронов тепловых энергий от источника $^{238}\text{PuBe}$ [6]. Разместив в канале коллиматора мишень в форме диска из титана или никеля, можно получить стационарное во времени поле захватного гамма-излучения с линиями высокой энергии [7].

Целью данной работы являлось исследование дозовых характеристик полей захватного излучения от мишеней из титана и никеля, полученных на поверочной установке нейтронного излучения УПН-АТ140, для использования в метрологическом обеспечении дозиметрических приборов радиационной защиты.

Материалы и методы

В государственном стандарте СТБ ИСО описаны способы получения эталонных полей для калибровки дозиметрической аппаратуры с энергиями от 4 до 9 МэВ⁴. В работе [8] предложено использовать реакцию захвата тепловых нейтронов на мишенях из титана и никеля (таблица 1).

Титановая мишень применяется для получения поля с энергиями до 7 МэВ, никелевая – до 10 МэВ.

При расположении мишени в потоке тепловых нейтронов она становится источником мгновенного захватного гамма-излучения. Для уве-

⁴ Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ ISO 4037-1:2014

¹ International standard IEC 61017:2016

² International standard IEC 60846-2:2015

³ International standard IEC 60846-1:2009

личения интенсивности излучения мишени на фоне остального спектра используется дополнительная фильтрация нейтронного и гамма-излучения (рисунок 1).

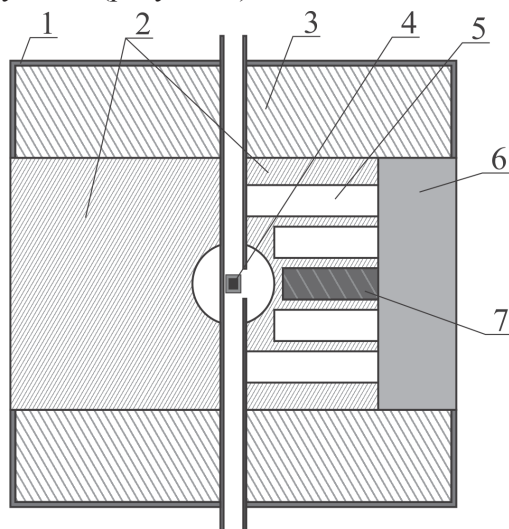


Рисунок 1 – Монте-Карло модель контейнера-коллиматора: 1 – кожух из алюминия; 2 – вставка для геометрии тепловых нейтронов; 3 – контейнер-коллиматор; 4 – $^{238}\text{PuBe}$ источник нейтронов ИБН–8–6; 5 – воздушные каналы; 6 – мишень с дополнительной фильтрацией; 7 – фильтр

Figure 1 – Monte-Carlo model of container-collimator: 1 – aluminum casing; 2 – insert for thermal neutron geometry; 3 – container-collimator; 4 – $^{238}\text{PuBe}$ fast neutron source (IBN–8–6); 5 – air channels; 6 – target with filtration; 7 – filter

Таблица 1 / Table 1

Основные выходы фотонов на 100 захватов нейтронов для титана и никеля

Principal photon yields of titanium and nickel per 100 neutron captures

Титан / Titanium		Никель / Nickel	
Энергия фотонов, МэВ Photon energy, MeV	Число фотонов Number of photons	Энергия фотонов, МэВ Photon energy, MeV	Число фотонов Number of photons
0,342	26,3	0,283	3,3
1,381	69,1	0,465	13
1,498	4,1	0,878	3,9
1,586	8,9	6,581	2,3
1,762	5,6	6,837	10,8
4,882	5,2	7,537	4,5
4,969	3,6	7,819	8,2
6,418	30,1	8,121	3,1
6,557	4,7	8,533	17
6,761	24,2	8,999	37,7

В работе [7] изучены спектральные характеристики полей гамма-излучения с помощью спектрометров на основе кристаллов NaI(Tl) ($\varnothing 63$ мм, $h = 160$ мм) и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ($\varnothing 38$ мм, $h = 38$ мм). Показана возможность градуировки этих спектрометров до 10 МэВ.

На основании экспериментальных и теоретических данных были выбраны несколько вариантов дополнительной фильтрации с целью увеличения относительного вклада в мощность кермы в определенном энергетическом интервале:

- 1) гамма-излучение от $^{238}\text{PuBe}$ источника ослабляется фильтром («закрытый» источник). В данном случае используется захватное излучение на ядре водорода (протоне) с энергией 2,223 МэВ для перекрытия интервала до 3 МэВ;
- 2) гамма-излучение от источника нейтронов не ослабляется фильтром («открытый» источник). Значение мощности кермы формируется в основном гамма-квантами с энергией 4,439 МэВ и перекрывает диапазон до 5 МэВ;
- 3) интервал от 5 до 7 МэВ обеспечивается излучением от титановой мишени, а от 7 до 10 МэВ – от никелевой мишени.

Таким образом, можно исследовать дозиметрический прибор в широком энергетическом диапазоне, последовательно меняя фильтрацию и используя мишени.

Для измерения мощности кермы в воздухе использовался эталонный дозиметр ДКС-АТ5350 с ионизационной камерой ТМ32002, которая обладает высокой степенью линейности (до 3 %) в интервале до 50 МэВ [3]. Рабочий объем свободновоздушной сферической камеры ТМ32002 1000 см³.

Результаты и их обсуждение

Детали разработки Монте-Карло модели помещения, контейнера-коллиматора установки УПН-АТ140 и источника $^{238}\text{PuBe}$ (ИБН-8-6) изложены в работе [6]. В настоящей работе для расчета мощности кермы в воздухе использовалась карта *tally f6* [9]. Энергетические распределения мощности кермы для обеих мишеней с шагом 50 кэВ приведены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что значительный вклад в мощность кермы в воздухе вносят характеристическое излучение от мишеней, захват на ядрах ^{10}B [10] и на ядрах водорода.

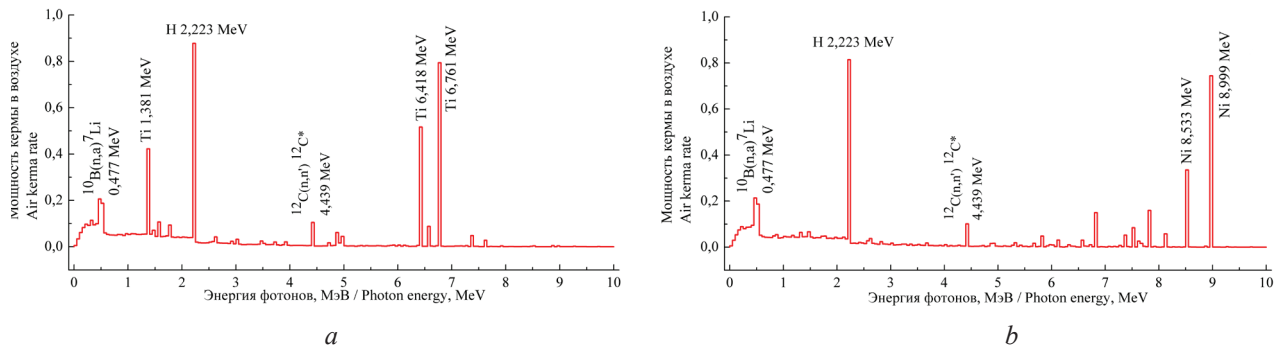


Рисунок 2 – Энергетическое распределение мощности кермы в воздухе для мишени из титана (а) и никеля (b)
Figure 2 – Energy distribution of air kerma rate for a titanium target (a) and a nickel target (b)

Измерения с ионизационной камерой проводились на расстоянии 550 мм от источника нейтронов. Относительный вклад мощности кермы

в воздухе в энергетические интервалы был рассчитан с помощью Монте-Карло моделирования (таблица 2).

Таблица 2 / Table 2

Результаты измерений мощности кермы в воздухе
Results of measurements of air kerma rate

Варианты фильтрации Filtration	Относительный вклад в полную мощность кермы в воздухе, % Contribution to the total air kerma rate, %					$\dot{K}_a$, мкГр/ч $\dot{K}_a$, μGy/h
	До 1,5 МэВ To 1,5 MeV	1,5–3 МэВ 1,5–3 MeV	3–5 МэВ 3–5 MeV	5–7 МэВ 5–7 MeV	7–10 МэВ 7–10 MeV	
«Закрытый» $^{238}\text{PuBe}$ (до 3 МэВ) «Filtered» $^{238}\text{PuBe}$ (to 3 MeV)	<40	~45	<8	<2	<5	14,15
«Открытый» $^{238}\text{PuBe}$ (до 5 МэВ) «Bare» $^{238}\text{PuBe}$ (to 5 MeV)	<15	<12	>70	<1	<1	50,08
Титан (до 7 МэВ) Titanium (to 7 MeV)	<35	<30	<10	~25	<2	12,77
Никель (до 10 МэВ) Nickel (to 10 MeV)	<35	<30	<8	<7	~25	11,62

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что при использовании мишеней с дополнительной фильтрацией можно получить до 25 % вклада по керме в интересующих нас энергетических интервалах. В случае «открытого» $^{238}\text{PuBe}$ источника – более 70 %.

Были определены характеристики полученных полей – геометрические размеры равномерного поля и интервал рабочих расстояний. Требования по равномерности поля не распространяются на установки без типового узла коллимации, однако в целях исследования такие измерения были проведены.

Для определения геометрических размеров равномерного поля по мощности кермы в воздухе использовалась ионизационная камера. На расстоянии 550 мм от источника нейтронов проводились измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (горизонтальном и вертикальном). В каждой точке i определялось значение мощности кермы в воздухе $\dot{K}_i$ и отклонение a_i от значения в центре $\dot{K}_0$:

$$a_i = \frac{\dot{K}_i - \dot{K}_0}{\dot{K}_0} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Отклонения a_i от значения в центре $\dot{K}_0$ лежат в пределах $\pm 6 \text{ \%}$ при смещении от оси до 15 см по горизонтали и вертикали.

При определении интервала рабочих расстояний для установок, имеющих коллимированное (неколлимированное) поле фотонного излучения и градуировочную линейку, обычно проверяют соблюдение закона обратных квадратов расстояний.

Произведение мощности кермы в воздухе излучения $\dot{K}_i$ в i -й рабочей точке на квадрат соответствующего расстояния от центра активной части источника излучения до эффективного центра детектора R_i должно быть постоянным с учетом ослабления излучения в воздухе и рассчитываться по формуле:

$$C_i = \dot{K}_i \cdot R_i^2 \cdot e^{\mu R_i},$$

где μ – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения в воздухе.

Относительное отклонение ΔC_i было рассчитано для каждой точки i через значение C_i для этой точки и среднее арифметическое значение коэффициента $\bar{C}$:

$$\Delta C_i = \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}} \cdot 100 \, \%.$$

Относительное отклонение ΔC_i лежит в пределах $\pm 5 \, \%$ для расстояний до 150 см от центра источника нейтронов.

Заключение

Мишени из титана и никеля, размещенные в канале контейнера-коллиматора поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140 с геометрией тепловых нейтронов, позволяют сформировать опорные дозиметрические поля захватного гамма-излучения до 7 МэВ (титановая мишень) и до 10 МэВ (никелевая мишень).

С учетом особенностей формирования полей гамма-излучения были выбраны различные варианты фильтрации, позволяющие увеличивать вклад в керму гамма-излучения в интересующем энергетическом интервале. Изменяя фильтрацию, можно проводить калибровку дозиметрического прибора с учетом сопутствующего образованию нейтронов гамма-излучения источника быстрых нейтронов $^{238}\text{PuBe}$, захватного излучения материалов коллиматора и захватного излучения от мишеней.

С помощью эталонного дозиметра ДКС-АТ5350 с ионизационной камерой ТМ32002 исследованы основные метрологические характеристики, такие как геометрические размеры равномерного поля, интервал рабочих расстояний и значение мощности кермы в точке. При помощи Монте-Карло моделирования рассчитано энергетическое распределение мощности кермы в воздухе для мишеней из титана и никеля.

Полученные поля гамма-излучения на установке УПН-АТ140 удобно применять для калибровки разрабатываемых средств радиационной защиты. Кроме того, существует номенклатурный ряд приборов с различными типами детекторов, которые можно дополнительно исследовать в подобных полях с целью расширения их энергетического диапазона измерений до 10 МэВ.

Список использованных источников

1. Isumasa, U. Systematics of Gamma-Ray Energy Spectra for Classification of Workplaces around a Nuclear Facility / U. Isumasa, T. Tadashi // *J. Jpn. Health Phys. Soc.* – 1985. – Vol. 3. – P. 1440–1443.
2. Rogers, D.O. A nearly mono-energetic 6–7 MeV photon calibration source / D.O. Rogers // *Health Physics*. – 1983. – Vol. 45, no. 1. – P. 127–137.
3. Ionizing radiation. Detectors. Including codes of practice / PTW – Freiburg. – 2017. – 95 p.
4. Duvall, K.C. The development of a 6–7 MeV photon field for instrument calibration / K.C. Duvall, H.T. Heaton, C.G. Soares // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1985. – P. 942–945.
5. Guldbakke, S. Properties of high-energy photon fields to be applied for calibration purposes / S. Guldbakke, D. Schaffer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 1990. – P. 367–371.
6. Комар, Д.И. Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140 / Д.И. Комар, С.А. Кутень // *Приборы и методы измерений*. – 2017. – № 1. – С. 23–31.
7. Комар, Д.И. Формирование поля захватного гамма-излучения до 10 МэВ для метрологического обеспечения приборов радиационной защиты / Д.И. Комар, Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, С.А. Кутень // *Приборы и методы измерений*. – 2016. – № 3. – С. 296–304.
8. Bermann, F. Étalonnage de détecteurs de radioprotection avec des gammas d'énergie supérieure à 1 MeV: utilisation de faisceaux de gammas de capture / F. Bermann, G. Portal // *Radioprotection*. – 1991. – Vol. 26, no. 3. – P. 493–513.
9. Briesmeister, J.F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B. LA-12625-M. – Los Alamos: Ed. Los Alamos National Laboratory, 1997. – 736 c.
10. Ceberg, C.P. Neutron capture imaging of ^{10}B in tissue specimens / C.P. Ceberg, L.G. Salford // *Radiotherapy and Oncology*. – 1993. – Vol. 26, iss. 2. – P. 139–146.

References

1. Isumasa U., Tadashi T., Systematics of Gamma-Ray Energy Spectra for Classification of Workplaces around a Nuclear Facility. *J. Jpn. Health Phys. Soc.*, 1985, vol. 3, pp. 1440–1443.
2. Rogers D. O. A nearly mono-energetic 6–7 MeV photon calibration source. *Health Physics*, 1983, vol. 45, no. 1, pp. 127–137.
doi: 10.1097/00004032-198307000-0001
3. Ionizing radiation. Detectors. Including codes of practice / PTW – Freiburg. – 2017. – 95 pp.
4. Duvall K.C., Heaton H.T., Soares C.G. The development of a 6–7 MeV photon field for instrument cali-

bration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1985, vol. 10–11, no. 2, pp. 942–945.

doi: 10.1016/0168-583X(85)90145-4

5. Guldbakke S., Schaffer S. Properties of high-energy photon fields to be applied for calibration purposes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1990, vol. 299, iss. 1–3, pp. 367–371.

doi: 10.1016/0168-9002(90)90806-H

6. Komar D., Kutsen S. [Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics of AT140 Neutron Calibration Facility]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 23–31 (in Russian).

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31

7. 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].

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

8. Bermann F. Étalonnage de détecteurs de radioprotection avec des gammas d'énergie supérieure à 1 MeV: utilisation de faisceaux de gammas de capture. *Radioprotection*, 1991, vol. 26, no. 3, pp. 493–513.

doi: 10.1051/radiopro/1991017

9. Bristmeister 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 p.

10. Ceberg C. P., Salford L. G. Neutron capture imaging of ^{10}B in tissue specimens. *Radiotherapy and Oncology*, 1993, vol. 26, iss. 2, pp. 139–146.

doi: 10.1016/0167-8140(93)90095-P

УДК 005.6:658.6

Обеспечение функциональной взаимозаменяемости при формировании контрольного комплекса показателей исходного состояния потребителя физкультурно-оздоровительных услуг

Хорлоогийн А.С., Серенков П.С., Романчак В.М.

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

Поступила 10.07.2017

Принята к печати 21.08.2017

Одним из ключевых элементов инженерной составляющей системы менеджмента качества процесса предоставления физкультурно-оздоровительных услуг в тренажерных залах является подсистема диагностики физического состояния клиента. Целью данной работы являлось повышение эффективности функционирования системы менеджмента качества процесса предоставления физкультурно-оздоровительных услуг в тренажерных залах за счет разработки методик корректного оценивания исходного состояния клиента.

Сформулирована задача формирования комплекса показателей исходного состояния по критерию необходимой информативности. Обоснован принцип функциональной взаимозаменяемости как методологическая основа для ее решения. Предложена иерархическая структура интегральной оценки исходного состояния клиента тренажерного зала. На ее основе разработана иерархическая модель нормирования информативности комплекса единичных (измеряемых) показателей, обеспечивающая объективность интегральной оценки исходного состояния. Корректность модели обеспечена за счет формулирования комплекса допущений и оригинальной технологии применения различных методов экспертного оценивания.

Результат моделирования информативности интегральной оценки исходного состояния клиента для конкретного вида услуги и целей физического совершенствования включает: 1) библиотеку наборов единичных показателей, для каждого из которых определена методика и средство контроля, а также оценка информативности в баллах, 2) правила обеспечения функциональной взаимозаменяемости альтернативных комплексов показателей по критерию достаточности информативности комплекса, основанные на аддитивных моделях и принятых ограничениях.

Предложена концепция методики формирования комплекса измеряемых и (или) оцениваемых показателей исходного состояния клиента для конкретного вида физкультурно-оздоровительной услуги, адаптированного под материально-технические возможности тренажерного зала с одной стороны, и отвечающего критерию необходимой информативности и принципу функциональной взаимозаменяемости, с другой стороны.

Ключевые слова: качество, услуги, оценка состояния, информативность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

Адрес для переписки:

Хорлоогийн А.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: khorlooghiyn@bntu.by

Address for correspondence:

Khorloohiyn A.S.
Belarusian national technical university,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: khorlooghiyn@bntu.by

Для цитирования:

Хорлоогийн А.С., Серенков П.С., Романчак В.М.
Обеспечение функциональной взаимозаменяемости при формировании контрольного комплекса показателей исходного состояния потребителя физкультурно-оздоровительных услуг. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 3. С. 286–296.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

For citation:

Khorloohiyn A.S., Serenkov P.S., Romanchack V.M.
[The Ensuring Functional Interchangeability when Forming the Control Complex of Indicators of the Initial Condition of the Consumer of Sports and Improving Services]. *Devices and Methods of Measurements*. 2017, vol. 8, no. 3, pp. 286–296 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

The Ensuring Functional Interchangeability when Forming the Control Complex of Indicators of the Initial Condition of the Consumer of Sports and Improving Services

Khorloohiyn A.S., Serenkov P.S., Romanchack V.M.

Belarusian national technical university,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 10.07.2017

Accepted for publication 21.08.2017

Abstract

One of key elements of an engineering component quality management system of process of provision of sports and improving services in gyms is the subsystem of diagnostics of physical client state. The aim of the study was to increase in efficiency of functioning of a quality management system of process of provision of sports and improving services in gyms due to development of techniques of incorrect estimation of the initial client state.

The task of formation of a complex of indices of the initial status by criterion of necessary informtiveness is formulated. The principle of the functional interchangeability as a methodological basis for its decision is reasonable. The hierarchical structure of an integral assessment of the initial client state of gym is offered. On its basis the hierarchical model of rating of informtiveness of a complex of the single (measured) indices, the providing objectivity of an integral assessment of the initial status is developed. The correctness of model is provided at the expense of a formulation of a complex of assumptions and original technology of application of different methods of expert estimation.

The result of simulation of informtiveness of an integral assessment of the initial client state for a specific type of service and the purposes of physical enhancement includes: 1) library of sets of single indices, for each of which the technique and a monitoring aid, and also an informtiveness assessment in points, 2) the rules of support of the functional interchangeability of alternative complexes of indices by criterion of sufficiency of informtiveness of a complex based on additive models and the accepted restrictions is defined.

The concept of a technique of formation of a complex of the measured and (or) evaluated indices of the initial client state for the specific type of sports and improving service adapted under material opportunities of gym on the one hand, and responding to criterion of necessary informtiveness and the principle of the functional interchangeability, on the other hand is offered.

Keywords: quality, services, status assessment, informtiveness.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

Адрес для переписки:

Хорлоогийн А.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: khorloogiyn@bntu.by

Address for correspondence:

Khorloohiyn A.S.
Belarusian national technical university,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: khorloogiyn@bntu.by

Для цитирования:

Хорлоогийн А.С., Серенков П.С., Романчак В.М.
Обеспечение функциональной взаимозаменяемости при формировании контрольного комплекса показателей исходного состояния потребителя физкультурно-оздоровительных услуг.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 3. С. 286–296.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

For citation:

Khorloohiyn A.S., Serenkov P.S., Romanchack V.M.
[The Ensuring Functional Interchangeability when Forming the Control Complex of Indicators of the Initial Condition of the Consumer of Sports and Improving Services].
Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 3, pp. 286–296 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-286-296

Введение

Устойчивая динамика роста требования к качеству услуг во всех сферах человеческой деятельности вызывает необходимость развития систем менеджмента качества поставщиков, и прежде всего в части разработки общих подходов, критериев, методологий обеспечения качества услуг [1]. Формирование этой тенденции обусловлено, в первую очередь, экономическими и юридическими аспектами достижения удовлетворенности потребителя в формате классических рыночных отношений «исполнитель (поставщик) – потребитель (клиент, заказчик)» [3].

Установлено, что наиболее проблемными с позиции обеспечения качества являются виды услуг, где преобладает субъективная составляющая организации процесса предоставления услуги. В частности, это относится, например, к физкультурно-оздоровительным услугам, которые являются одним из важнейших направлений повышения качества жизни за счет улучшения физического и функционального состояния человека. Причем последнее в соответствии с пожеланиями (целями) клиента характеризуется определенным комплексом физических и функциональных показателей организма.

Установлено, что результат физической подготовки во многом зависит от правильного определения исходного физического состояния потребителя услуги и, соответственно, корректной программы физической подготовки, соответствующей этому состоянию [4]. В связи с этим есть высокий риск неудовлетворенности потребителя, так как с учетом существующей практики в планировании и организации процесса физической подготовки ключевую роль занимает инструктор, т.е. имеет место доминирующая субъективная составляющая процесса предоставления услуги.

Методы и средства оценки физического состояния клиента в практике физической подготовки представлены достаточно широко (клинические, параклинические, методы и средства спортивной медицины и др.) [5]. Однако необходимо учитывать, что каждая организация, предоставляющая физкультурно-оздоровительные услуги, имеет свой уникальный (в части количества и качества) парк оборудования для проведения первичной диагностики клиента – контроля ис-

ходного состояния. Цель работы – обеспечить полноценную и достоверную оценку исходного состояния клиента, например, тренажерного зала, с помощью имеющегося в его распоряжении комплекса организационно-технических средств диагностики.

Функциональная взаимозаменяемость контрольных комплексов показателей функционального и физического состояния потребителя физкультурно-оздоровительных услуг

По результатам анализа современного состояния процесса предоставления физкультурно-оздоровительных услуг в тренажерном зале разработана структура организационно-технической составляющей системы менеджмента качества, гарантированно обеспечивающая требования клиента, которая включает: 1) подсистему идентификации целей, 2) подсистему диагностики физического состояния, 3) подсистему формирования программы физической подготовки, 4) подсистему анализа и обратной связи.

Ключевую роль в структуре системы играет подсистема диагностики физического состояния клиента тренажерного зала, которая предполагает определение интегрального показателя физического состояния клиента, представляющего собой совокупность показателей физической работоспособности и функциональных параметров организма. Оценка интегрального показателя характеризует возможность клиента достигнуть поставленных целей [4].

Основу подсистемы составляет модульная система формирования контрольного комплекса показателей функционального и физического состояния клиента, поддерживаемого, имеющимся в организации, комплексом организационно-технических средств, и обеспечивающим достоверную оценку интегрального показателя исходного состояния клиента. Методологической основой системы принят принцип функциональной взаимозаменяемости [1, 6].

Аналогами предлагаемого подхода являются системы назначения контрольного комплекса показателей качества промышленных технических объектов. Например, формирование комплексов показателей точности зубчатых передач в соответствии с ГОСТом 1643 [6].

Основным рекомендуемым способом контроля функционального и физического состояния человека является медицинский контроль, который подразумевает использование клинических и параклинических методов медицинского обследования [5]. Как правило, тренажерные залы, предоставляющие физкультурно-оздоровительные услуги, не имеют в наличии сложного оборудования медицинского контроля показателей функционального состояния и физической подготовленности клиента.

Тем не менее, при определенных ограничениях можно без потери достоверности интегральной оценки исходного состояния клиента воспользоваться средствами и методами контроля, широко применяемыми в практике спортивной медицины и физического воспитания с учетом имеющейся материально-технической и методической базы организации. К ним относятся функциональные пробы, тестовые задания, в том числе и с применением методов экспертных оценок. Задача сводится к разработке методики формирования взаимозаменяемого комплекса измеряемых и (или) оцениваемых показателей, адаптированного по возможности под возможности тренажерного зала с одной стороны, и отвечающего критерию необходимой информативности, с другой стороны.

Иерархическая структура интегральной оценки исходного состояния клиента тренажерного зала

Руководствуясь результатами анализа литературных источников, наилучшей практики в области предоставления физкультурно-оздоровительных услуг, мы предлагаем иерархическую структуру интегральной оценки исходного состояния клиента тренажерного зала, сформированную по критерию необходимой информативности.

На первом уровне иерархии предлагается интегральную оценку исходного состояния клиента в зависимости от вида услуг и целей физического совершенствования представить тремя комплексными показателями [4, 5]:

1) ФР – показатель физического развития, характеризующий физическое развитие клиента (кожно-жировая складка, динамометрия кистевая и др.);

2) ФС – показатель функционального состояния, характеризующий состояние сердеч-

но-сосудистой, дыхательной и других функциональных систем клиента (проба Ромберга, проба Штанге и др.);

3) ФП – показатель физической подготовленности, характеризующий состояние физической подготовленности клиента (бег 60 м, прыжок вверх с места и др.).

Соответственно, объективно охарактеризовать исходное состояние клиента возможно с помощью подобранного контрольного комплекса единичных (измеряемых) показателей, представляющих для конкретного вида услуг и целей физического совершенствования все три комплексных показателя, причем оцененная интегральная информативность комплекса должна быть не ниже некоторого критического значения. Это условие обеспечивает взаимозаменяемость альтернативных комплексов показателей.

Интегральная оценка исходного состояния клиента (ОИС) в общем случае может быть представлена функцией связи некоторого вида [4]:

$$\text{ОИС} = \text{ФР} * \text{ФС} * \text{ФП}, \quad (1),$$

где ФР – комплексный показатель физического развития клиента; ФС – комплексный показатель функционального состояния клиента; ФП – комплексный показатель физической подготовленности клиента.

В свою очередь, оценка каждого комплексного показателя может быть представлена некоторой совокупностью оценок второго уровня иерархии. В общем случае декомпозиция оценок может быть продолжена до третьего и более уровней иерархии.

Установлено, например, что комплексная оценка физического развития клиента ФР может быть представлена функцией связи некоторого вида:

$$\text{ФР} = \text{ФР}_a * \text{ФР}_b * \text{ФР}_v, \quad (2)$$

где ФР_a – комплексный показатель физического развития клиента по габаритному уровню варьирования (длина тела в различных положениях, окружность частей тела и др.); ФР_b – комплексный показатель физического развития клиента по компонентному уровню варьирования (оценка жировой, мышечной и костной масс); ФР_v – комплексный показатель физического развития клиента по пропорционному

уровню варьирования (соотношение размеров отдельных и конечностей с длиной тела и между собой).

Показатели ФРа, ФРб, ФРв могут быть представлены как единичными показателями (измеряемыми), так и комплексными показателями.

Модель оценивания информативности комплекса показателей, формирующего интегральную оценку исходного состояния клиента

Следует отметить, что модель оценивания информативности комплекса показателей, формирующих интегральную оценку исходного состояния клиента и модель оценивания исходного состояния клиента, принципиально отличаются друг от друга и, в первую очередь, задачами, которые они решают.

Задача модели оценивания исходного состояния клиента – обеспечить достоверность результатов оценивания и их пригодность для принятия решения о программе и индивидуальном плане физической подготовки клиента.

Задача модели оценивания информативности комплекса показателей – верифицировать состав контрольного комплекса показателей по критерию необходимой и достаточной информативности интегральной оценки исходного состояния клиента.

В данной статье мы рассматриваем только модель оценивания информативности комплекса показателей.

Определим информативность как свойство контрольного комплекса показателей, характеризующее его возможность давать оценку исходного состояния клиента, которая:

1) корректна с точки зрения принятия адекватного решения о программе и индивидуальном плане физической подготовки клиента;

2) эквивалентна оценке, полученной альтернативным контрольным комплексом показателей.

Каждый тренажерный зал может сформировать для одного и того же вида услуги свой контрольный комплекс показателей, привязываясь прежде всего к имеющейся у него материально-технической и методической базе. Определим норму допустимой информативности интегральной оценки исходного состояния клиента как «не менее 100 баллов», т.е. $I_{\text{ОИС}} \geq 100$.

Очевидно, что в зависимости от вида физического совершенствования и поставленной цели нормы $I_{\text{ФР}}$, $I_{\text{ФС}}$, $I_{\text{ФП}}$ информативности комплексных оценок показателей ФР, ФС, ФП (1), как доли допустимой информативности $I_{\text{ОИС}}$ интегральной оценки ОИС, могут меняться и, возможно, существенно. Для оценивания этих долей следует применить методы экспертного оценивания.

Модель оценивания информативности построена на основе следующих допущений:

1) информативность каждого единичного показателя зависит от вида физкультурно-оздоровительной услуги и поставленных целей и является в общем случае величиной переменной;

2) информативность интегральной оценки исходного состояния клиента с точностью до постоянной определяется аддитивной функцией связи с информативностями единичных показателей, входящих в контрольный комплекс;

3) в зависимости от вида физкультурно-оздоровительной услуги и поставленных целей на функцию связи могут накладываться ограничения, определяющие приоритет (весомость) информативности показателей той или иной группы в интегральной (комплексной) оценке.

Аддитивность функции связи обоснована принятым в теории информации положением о дискретной структуре количества информации (единица измерения – «условный бит информации») и аддитивной структуре ее накопления [7, 8, 9].

Поэтому модель информативности $I_{\text{ОИС}}$ интегральной оценки исходного состояния клиента ОИС на первом уровне иерархии рационально представить простой аддитивной функцией связи:

$$I_{\text{ОИС}} \geq I_{\text{ФР}} + I_{\text{ФС}} + I_{\text{ФП}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{ФР}}$, $I_{\text{ФС}}$, $I_{\text{ФП}}$ – нормы информативности комплексных показателей ФР, ФС, ФП (1).

Для решения задачи декомпозиции нормы $I_{\text{ОИС}}$ обосновано применение простого метода балльных оценок [7, 8, 10]. На данном этапе это наиболее комфортный для экспертов метод экспертного оценивания. Выбор нормы допустимой информативности интегральной оценки в 100 баллов также не случаен. В совокупности

метод и норма ассоциируются с оцениванием «доли части в целом» в процентах и дают достаточно приемлемую достоверность результатов оценивания.

Рассмотрим для примера вид физическо-го совершенствования – корректировку фигуры. Для определения доли информативности комплексных оценок показателей ФР, ФС, ФП в информативности интегральной оценки ОИС исходного состояния клиента, пришедшего в тренажерный зал, была сформирована группа экспертов из числа опытных специалистов – инструкторов. Каждому эксперту было предложено оценить в процентном отношении доли информативности комплексных показателей ФР, ФС, ФП в формировании заданного уровня информативности интегральной оценки исходного состояния клиента ОИС. Результаты оценки представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Оценка долей информативности комплексных показателей в формировании заданного уровня информативности интегральной оценки исходного состояния клиента

Assessment of shares of informativeness of complex indices in formation of the given level of informativeness of an integral assessment of the initial client state

Эксперт Expert	Группа показателей ФР, доля информативности $I_{ФР} \%$ Group of indicators PhD, informativeness share $IC_{PhD} \%$	Группа показателей ФС, доля информативности $I_{ФС} \%$ Group of indicators FS, informativeness share $IC_{FS} \%$	Группа показателей ФП, доля информативности $I_{ФП} \%$ Group of indicators PhF, informativeness share $IC_{PhF} \%$
№ 1	60	20	20
№ 2	50	30	20
№ 3	50	25	25
№ 4	70	20	10
№ 5	60	30	10
№ 6	60	20	20
№ 7	50	30	20
Среднее значение Average	57,14	25	17,86

Если принять полученные числовые значения долей в качестве норм информативности $I_{ФР}$, $I_{ФС}$, $I_{ФП}$ комплексных показателей ФР, ФС, ФП, то задача декомпозиции нормы $I_{ОИС}$ делится на три независимые задачи второго уровня иерархии: формирование моделей информативности $I_{ФР}$, $I_{ФС}$, $I_{ФП}$ комплексных показателей ФР, ФС, ФП соответственно (рисунок 1).

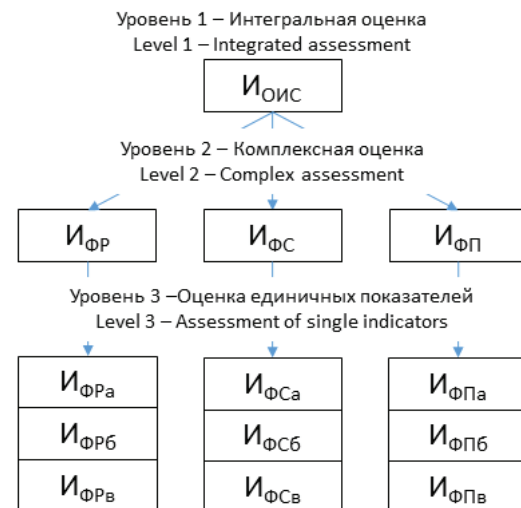


Рисунок 1 – Декомпозиция нормы информативности $I_{ОИС}$
Figure 1 – The decomposition of informational content norm IC_{AIS}

Для решения задачи декомпозиции норм второго уровня иерархии $I_{ФР}$, $I_{ФС}$, $I_{ФП}$ применение простого метода балльных оценок по аналогии с декомпозицией интегрального показателя $I_{ОИС}$ на первом уровне иерархии модели, на наш взгляд, не корректно.

Рассмотрим решение данной задачи на примере формирования норм информативности показателей второго уровня иерархии, определяющих комплексную оценку ФР (рисунок 2).

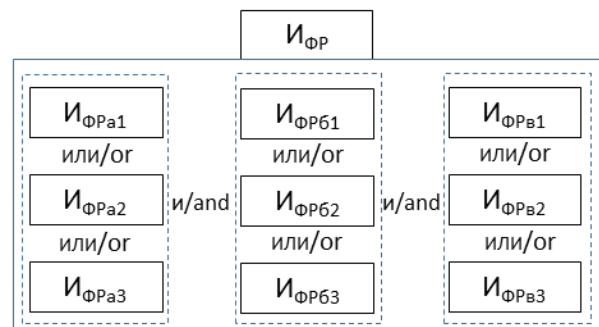


Рисунок 2 – Формирование нормы информативности ФР

Figure 2 – The formation of informational content norm PhD

Модель информативности $I_{ФР}$ с учетом (3) и рис. 2 рационально представить также простой аддитивной функцией связи:

$$I_{ФР} \geq I_{ФРa} + I_{ФРб} + I_{ФРв}, \quad (4)$$

где $I_{ФРa}$, $I_{ФРб}$, $I_{ФРв}$ – нормы информативности оценок комплексных показателей второго уровня иерархии ФРа, ФРб, ФРв (3).

Деление нормы информативности $I_{\Phi P}$ комплексного показателя ΦP на нормы информативности показателей второго уровня иерархии $I_{\Phi Pa}$, $I_{\Phi Pb}$, $I_{\Phi Pc}$ в процентном отношении или «условных битах информации», очевидно, должно производиться по результатам опроса той же группы экспертов, что и на предыдущем уровне иерархии. Проблема заключается в обеспечении прослеживаемости шкал оценки показателей на всех уровнях иерархии модели. Для сохранения масштаба шкалы информативности (шкалы измерения I_{OIC}) вопрос, задаваемый каждому эксперту на втором уровне иерархии, должен включать сложную логическую цепочку прослеживаемости: «какова доля информативности группы показателей ΦPa в информативности комплексного показателя ΦP , при условии, что его доля в информативности I_{OIC} интегральной оценки ОИС исходного состояния клиента составляет 57 %» (таблица 1).

Наши исследования показали, что коэффициент согласованности экспертов в оценках показателей второго уровня иерархии в 1,5–2 раза ниже по сравнению с первым уровнем. Очевидно, что и достоверность оценок в этом случае снижается. Следует ожидать, что на последующих уровнях иерархии модели (рисунок 1) сложность вопросов к экспертам будет, соответственно, возрастать и, как следствие, достоверность оценок будет катастрофически падать.

Для решения проблемы обеспечения достаточной достоверности оценок информативности на втором и ниже уровнях иерархии модели (3) предложен подход, включающий два этапа [8, 10].

1-й ЭТАП. Методом альтернатив, в рамках которого экспертам предлагалось последователь-

но оценить не абсолютные доли информативности факторов, а разности между ними двумя способами:

1-й способ – «каждый последующий показатель в ряду альтернатив с предыдущим» (сравнение по плану А);

2-й способ – «каждый показатель в ряду альтернатив с одним», причем в качестве последнего был выбран, например, наилучший вариант (сравнение по плану Б).

При этом каждому эксперту было предложено оценить по вербальной шкале Саати, [8] «насколько доля информативности одного комплексного показателя, например, ΦPa , больше или меньше доли информативности другого комплексного показателя, например, ΦPb ». Результаты оценивания представлены в таблице 2.

2-й ЭТАП. Полученные оценки информативности, в нашем примере, $I_{\Phi Pa}$, $I_{\Phi Pb}$, $I_{\Phi Pc}$, нормируются и приводятся к масштабу декомпозируемого параметра $I_{\Phi P}$. Это позволяет автоматически согласовать оценки с масштабом шкалы интегральной нормы I_{OIC} (таблица 3).

Третий уровень иерархии модели информативности (рисунок 1) предполагает формирование наборов единичных показателей (измеряемых или оцениваемых) и определение оценок их информативности в единой шкале интегральной нормы I_{OIC} .

Модель информативности каждого комплексного показателя (в нашем примере $I_{\Phi Pa}$) с учетом (3), (4) и рисунка 2 рационально представить также простой аддитивной функцией связи:

$$I_{\Phi Pa} \geq I_{\Phi Pa1} + \dots + I_{\Phi Pan}, \quad n \geq 1. \quad (5)$$

Таблица 2 / Table 2

Оценка долей информативности показателей второго уровня иерархии в формировании заданного уровня информативности комплексной оценки физического развития $I_{\Phi P}$
Assessment of shares of informtiveness of indices of the second level of hierarchy in formation of the given level of informtiveness of a complex assessment of physical development of IC_{PhD}

Планы сравнительного эксперимента показателей $I_{\Phi Pa}$, $I_{\Phi Pb}$, $I_{\Phi Pc}$ Plans of a comparative experiment of indices IC_{PhDa} , IC_{PhDb} , IC_{PhDc}		Эксперты/ Expert							Среднее значение Average
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	
План А: «каждый последующий показатель с предыдущим» Plan A: «each subsequent index with previous»	$I_{\Phi Pa} - I_{\Phi Pb} / IC_{PhDa} - IC_{PhDb}$	0	0	0	1	0	1	0	0,29
	$I_{\Phi Pb} - I_{\Phi Pc} / IC_{PhDb} - IC_{PhDc}$	1	0	0	1	1	0	1	0,57
План Б: «каждый последующий показатель с одним» Plan B: «each subsequent index with one»	$I_{\Phi Pa} - I_{\Phi Pb} / IC_{PhDa} - IC_{PhDb}$	0	0	0	1	0	1	0	0,29
	$I_{\Phi Pa} - I_{\Phi Pc} / IC_{PhDa} - IC_{PhDc}$	1	0	1	0	1	0	0	0,43

Таблица 3 / Table 3

Информативность единичных показателей физического развития

Informtiveness of single indices of physical development

Нормализованное значение нормы, план А / The normalized value of a norm, plan A	Нормализованное значение нормы, план Б / The normalized value of a norm, plan B	Среднее значение нормы / Average norms	Значение нормы в масштабе шкалы интегральной нормы $I_{ОИС}$ Value of a norm on the scale of a scale of the integral norm $I_{ОИС}$
$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = 1$	$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = 1$	$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = 1$	$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = \frac{1}{1 + 0,71 + 0,5} \cdot 57 \% = 25,8 \%$
$I_{ФРб} / IC_{PhDb} = 0,71$	$I_{ФРб} / IC_{PhDb} = 0,71$	$I_{ФРб} / IC_{PhDb} = 0,71$	$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = \frac{0,71}{1 + 0,71 + 0,5} \cdot 57 \% = 18,3 \%$
$I_{ФРв} / IC_{PhDc} = 0,43$	$I_{ФРв} / IC_{PhDc} = 0,57$	$I_{ФРв} / IC_{PhDc} = 0,5$	$I_{ФPa} / IC_{PhDa} = \frac{0,5}{1 + 0,71 + 0,5} \cdot 57 \% = 12,9 \%$

Оценку информативности каждого единичного показателя (например, $I_{ФPa}$) на данном уровне иерархии модели (3) в пределах набора однородных показателей следует производить по аналогии со вторым уровнем иерархии модели. С учетом того, что наборы единичных показателей – незаконченные множества, мы рекомендуем на первом этапе менеджеру тренажерного зала определиться с конечным множеством единичных показателей, методики и средства контроля которых наиболее приемлемы. Приемлемость предполагает, что то или иное средство контроля (методика) уже используется в практике деятельности тренажерного зала или его приобретение целесообразно.

Результат моделирования информативности $I_{ОИС}$ интегральной оценки исходного состояния клиента ОИС для конкретного вида услуги и целей физического совершенствования включает:

- 1) библиотеку наборов единичных показателей, для каждого из которых определена методика и средство контроля, а также оценка информативности в баллах;
- 2) правила обеспечения взаимозаменяемости альтернативных комплексов показателей по критерию достаточности информативности комплекса, основанные на аддитивных моделях (3), (4), (5) и принятых ограничениях.

Формирование комплекса показателей по критерию достаточной информативности

Для конкретного вида услуги и целей потенциального потребителя менеджер тренажерного

зала для каждой подгруппы третьего уровня иерархии (рисунки 1 и 2) формирует наборы единичных (измеряемых) показателей на нижнем (третьем) уровне иерархии, суммарная информативность которых не менее соответствующей нормы.

В нашем примере, менеджер формирует наборы единичных показателей в подгруппах ФР_а, ФР_б, ФР_в, руководствуясь критериями достаточной информативности:

$$(I_{ФPa1} + \dots + I_{ФPaN}) \geq I_{ФPa}$$

$$(I_{ФРб1} + \dots + I_{ФРбМ}) \geq I_{ФРб}$$

$$(I_{ФРв1} + \dots + I_{ФРвК}) \geq I_{ФРв}$$

При этом нормы информативности $I_{ФPa}$, $I_{ФРб}$, $I_{ФРв}$ получены из условия:

$$I_{ФPa} + I_{ФРб} + I_{ФРв} \geq I_{ФР}$$

Аналогично формируются остальные два набора единичных показателей, характеризующих комплексные показатели второго уровня иерархии ФС, ФП (рисунок 1).

В свою очередь нормы информативности комплексных показателей второго уровня иерархии $I_{ФР}$, $I_{ФС}$, $I_{ФП}$ получены из условия:

$$I_{ФР} + I_{ФС} + I_{ФП} \geq I_{ОИС}$$

Пример формирования взаимозаменяемых комплексов показателей для вида услуги тренажерного зала спортивно-оздоровительного центра Белорусского национального технического университета представлен в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Пример формирования комплекса показателей для оценки исходного состояния клиента для предоставления услуги «корректировка фигуры»

Показатели первого уровня иерархии		Показатели второго уровня иерархии		Третий уровень иерархии – комплекс измеряемых показателей		
Показатель комплексный	Норма информативности	Показатель комплексный	Норма информативности	Показатель единичный	Оцененная информативность	Средство (методика)
Показатель физического развития ФР	$I_{ФР} \geq 57$	ФРа – группа показателей габаритного уровня	$I_{ФРа} \geq 26$	Показатель «рост стоя и сидя»	$I_{ФРа1} = 26$	ростомер $I_{ФРа1}$
		ФРб – группа показателей компонентного уровня	$I_{ФРб} \geq 18$	Показатель массы тела	$I_{ФРб1} = 20$	электронные медицинские весы $I_{ФРб1}$
		ФРв – группа показателей пропорционного уровня	$I_{ФРв} \geq 13$	Показатель крепости телосложения	$I_{ФРв1} = 15$	Методика: определение показателя $X = P - (B + O)$, где X – индекс, P – рост (см), B – масса тела (кг), O – окружность груди в фазе выдоха $I_{ФРв1}$
Показатель функционального состояния ФС	$I_{ФС} \geq 25$	-	-	Показатели давления и частоты сердечных сокращений	$I_{ФС2} = 30$	Тонومتر
Показатель физической подготовленности ФП	$I_{ФП} \geq 18$	-	-	Показатель – повороты на гимнастической скамье	$I_{ФП2} = 18$	Тестирование
Суммарное значение информативности выбранных показателей					109	

An example of formation of a complex of indices for an assessment of the initial client state for provision of the service «adjustment of a figure»

Indices of the first level of hierarchy		Indices of the second level of hierarchy		The third level of hierarchy – a complex of the measured indices		
Complex index	Informativeness norm	Complex index	Informativeness norm	Single index	The estimated informativeness	Instrument (method)
Index of physical development PhD	$IC_{PhD} \geq 57$	PhDa – group of indices of dimensional level	$IC_{PhDa} \geq 26$,	Index «costing growth and sitting»	$IC_{PhDa1} = 26$	Height meter IC_{PhDa1}
		PhDb – group of indices of component level	$IC_{PhDb} \geq 18$,	Body weight index	$IC_{PhDb1} = 20$	Electronic medical scales IC_{PhDb1}
		PhDc – group of indices of proportion level	$IC_{PhDc} \geq 13$	Constitution fortress index	$IC_{PhDc1} = 15$	Method: measure definition $X = P - (B + O)$, где X – index, P – body height (cm), B – body weight (kg), O – breast circle in an exhalation phase IC_{PhDc1}
Index of the functional status FS	$IC_{FS} \geq 25$	-	-	Indices of pressure and heart rate	$IC_{FS2} = 30$	Tonometer
Index of physical fitness PhF	$IC_{PhF} \geq 18$	-	-	Index – turns on a gymnastic bench	$IC_{PhF2} = 18$	Test
Summary value of informativeness of the selected indices					109	

Из таблицы 4 видно, что суммарное значение информативности выбранного комплекса показателей составляет **109**, которое превышает допустимое значение информативности выбранного комплекса, что в свою очередь гарантирует выполнение требования необходимой и достаточной информативности комплекса показателей для оценки исходного состояния клиента.

Заключение

Обоснована актуальность проблемы формирования в рамках системы менеджмента качества эффективной подсистемы диагностики исходного состояния клиента тренажерного зала, предоставляющего физкультурно-оздоровительные услуги.

Идентифицирована задача обеспечения необходимой достоверности оценки исходного состояния клиента, что позволяет разработать адекватную программу и план его физической подготовки для достижения поставленной цели.

Техническое решение задачи – формирование комплекса показателей исходного состояния клиента по критерию необходимой информативности. В качестве методологической основы принят принцип функциональной взаимозаменяемости. Предложена иерархическая структура интегральной оценки исходного состояния клиента тренажерного зала. На ее основе разработана иерархическая модель нормирования информативности комплекса единичных (измеряемых) показателей, обеспечивающая объективность интегральной оценки исходного состояния. Корректность модели обеспечена за счет формулирования комплекса допущений и оригинальной технологии применения различных методов экспертного оценивания.

Результат моделирования информативности интегральной оценки исходного состояния клиента для конкретного вида услуги и целей физического совершенствования включает: 1) библиотеку наборов единичных показателей, для каждого из которых определена методика и средство контроля, а также оценка информативности в баллах, 2) правила обеспечения функциональной взаимозаменяемости альтернативных комплексов показателей по критерию достаточности информативности комплекса, основанные на аддитивных моделях и принятых ограничениях.

Предложена методика при формировании комплекса измеряемых (оцениваемых) показателей исходного состояния клиента для конкретного вида физкультурно-оздоровительной услуги,

адаптированного под материально-технические возможности тренажерного зала с одной стороны, и отвечающего критерию необходимой информативности и принципу функциональной взаимозаменяемости, с другой стороны. Приведен пример ее реализации.

Список использованных источников

1. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология описания сети процессов: монография / П.С. Серенков, А.Г. Курьян, В.Л. Соломахо. – Минск : БНТУ, 2006. – 484 с., ил.: 139.
2. Репин, В.В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
3. Чайка, И.И. Конкурентная борьба предприятий – это соревнование систем управления качеством / И.И. Чайка // Стандарты и качество. – 1996. – № 12. – С. 55–59.
4. Хорлоогийн, А.С. Определение концепции качества физического совершенствования человека в контексте качества жизни / А.С. Хорлоогийн, П.С. Серенков, В.Е. Васюк, С.Г. Ковель // Методы и приборы измерений. – 2011. – № 2. – С. 152–158.
5. Макарова, Г.А. Спортивная медицина / Г.А. Макарова. – М. : Советский спорт, 2002. – 478 с.
6. Соломахо, В.Л. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 296 с.
7. Орлов, А.И. Современная прикладная статистика / Орлов А.И. // Заводская лаборатория. – 1998. – № 3. – С. 52–60.
8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
9. Рожков, Н.Н. Квалиметрия и управление качеством. Математические методы и модели / Н.Н. Рожков. – СПб. : ИПЦ СПГУТД, 2007. – 185 с.
10. Саати, Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Саати; пер. с англ. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.

References

1. Serenkov P.S., Kuryan A.G., Solomakho V.L. *Metodyi menedzhmenta kachestva. Metodologiya opisan- iya seti protsessov: monografiya* [Quality management methods. Methodology of the description of a network of processes: monograph]. Minsk, BNTU Publ., 2006, 484 p. (in Russian).
2. Repin V.V., Eliferov V.G. *Protsessnyiy podhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protsessov* [Process approach to control. Business process modeling]. Moscow, RIA «Standards and quality» Publ., 2004, 408 p. (in Russian).

3. Chayka I.I. [Competition of the enterprises is a competition of management systems quality]. *Standartyi i kachestvo* [Standards and quality], 1996, no. 12, pp. 55–59 (in Russian).

4. Horlooghiyn A.S., Serenkov P.S., Vasyuk V.E., Kovel S.G. [Determination of the concept of quality of physical enhancement of the person in the context of quality of life] *Metodyi i priboryi izmereniy* [Methods and instruments of measurements], 2011, no. 2, pp. 152–158 (in Russian).

5. Makarova G.A. *Sportivnaya meditsina* [Sporting medicine]. Moscow, Sovetsky Sport Publ., 2002, 478 p. (in Russian).

6. Solomakho V.L., Tsitovich B.V. *Osnovyi standartizatsii, dopuski, posadki i tehnikeskie izmereniya* [Standardization bases, tolerances, fits and technical measurements], Minsk, *Dizayn PRO* [Design PRO], 2004, 296 p. (in Russian).

7. Orlov A.I. *Sovremennaya prikladnaya statistika* [The modern application-oriented statistics]. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory], 1998, no. 3, pp. 52–60 (in Russian).

8. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarhiy* [Decision-making. Method of the analysis of hierarchies], Moscow, *Radio i svyaz* Publ. [Radio and communication], 1993, 278 p. (in Russian).

9. Rozhkov N.N. *Kvalimetriya i upravlenie kachestvom. Matematicheskie metody i modeli* [Kvalimetriya and quality management. Mathematical methods and models], St. Peterburg, IPTs SPGUTD, 2007, 185 p. (in Russian).

10. Saati T. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyah i obratnyih svyazyah: Analiticheskie seti* [Decision-making in case of dependences and back couplings: Analytical networks], Lanes with English — Moscow, *LKI* Publ. [LKI publishing house], 2008, 360 p. (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и четким. Фотографии представляются в электронном виде (**формат tif, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подписными 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 подписной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы, символы химических элементов (в т.ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы:
74835; 748352