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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Nº 1

Vol. 10

Том 10

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 10

Nº 1

2019

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания) Матеос Х., к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)

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

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

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

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

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

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

Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

Юмашев К.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Редактор: Чабарова О.Л.

Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений»

Подписано в печать 06.03.2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 5,09. Тираж 150 экз.

Дата выхода в свет 15.03.2019. Заказ № 125

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

© «Приборы и методы измерений», 2019

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

Volume 10

Nº 1

2019

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

Victor M. Anishchik, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Solid State Physics, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

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

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

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

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

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

Steven Danyluk, *PhD*, *Professor*, *Production and Research Center*, *Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)* **Anatoly L. Zharin**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Pawel Żukowski, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Devices and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

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

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

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

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

Alan Kemp, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom) Xavier Mateos, PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

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

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

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

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

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

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

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

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

ADDRESS:

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

© «Devices and Methods of Measurements», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya, P. Zukowski	
Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures	7
K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov	
Er,Yb:Ca ₃ RE ₂ (BO ₃) ₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 μm Laser Crystals	14
Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносновская	
Устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно- космической техники	23
А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В. Чумаков, А.В. Домарацкий	
Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр	32
Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, И.В. Булдакова	
Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов	42

Методы измерений, контроля, диагностики

С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязапов, А.В. Мамаев, А.Е. Соборнов, А.В. Котин, М.А. Легчанов, А.В. Львов	
Измерение температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций	53
Н.А. Поклонский, А.И. Сягло, С.А. Вырко, С.В. Раткевич, А.Т. Власов	
Модель автоэлектронной эмиссии из торца плоского графена в вакуум	61
А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая	
Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой	69
А.М. Тимофеев	
Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0»	80
С.Г. Сандомирский	
Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведенной погрешности измерения	90
Методы оценки качества объектов и процессов	

П.С. Серенков, В.М. Романчак	
Качество как субъективно измеряемая величина	99

CONTENTS

Measuring Instruments

G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya, P. Żukowski	
Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures	7
K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov	
Er,Yb:Ca3RE2(BO3)4 (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals	14
B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy, D.M. Zhivonosnovskaya	
Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and Space Technique Elements	23
A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov, A.V. Damaratski	
The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer	32
L.V. Volkova, O.V. Muraveva, V.V. Muravev, I.V. Buldakova	
Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal	42

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample under the Local 5 Stochastic Temperature Pulsations	S.M. Dmitriev, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, A.E. Sobornov, A.V. Kotin, M.A. Legchanov, A.V. Lvov	
Stochastic Temperature Pulsations	Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample under the Local	52
N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, A.T. Vlassov 6 Model of Field Electron Emission from the Edge of Flat Graphene into Vacuum	Stochastic Temperature Pulsations	53
Model of Field Electron Emission from the Edge of Flat Graphene into Vacuum	N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, A.T. Vlassov	
 A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer	Model of Field Electron Emission from the Edge of Flat Graphene into Vacuum	61
Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer	A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya	
Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer	Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of	
 A.M. Timofeev Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»	Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer	69
Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»	A.M. Timofeev	
Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»	Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the Photon Counter Based on the	
S.G. Sandomirski Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced Measurement Error	Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»	80
Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement andIts True Values on the Reduced Measurement Error.9	S.G. Sandomirski	
Its True Values on the Reduced Measurement Error. 9	Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and	
	Its True Values on the Reduced Measurement Error	90

Methods of Quality Estimation of Products and Processes

P.S. Serenkov, V.M. Romanchak	
Quality as Subjectively Measured Value	99

Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures

G.G. Bondarenko¹, M.R. Fisher², V.I. Kristya², P. Żukowski³

 ¹National Research University Higher School of Economics, Myasnitskaya str., 20, Moscow 101000, Russia
 ²Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Bazhenov str., 2, Kaluga 248000, Russia
 ³Lublin University of Technology, Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland

Received 17.12.2018 Accepted for publication 28.02.2019

Abstract

The mixture of argon and mercury vapor with temperature-dependent composition is used as the background gas in different types of gas discharge illuminating lamps. The aim of this work was to develop a model of the low-current discharge in an argon-mercury mixture at presence of a thin insulating film on the cathode and to investigate the influence of film on the discharge ignition voltage at low ambient temperatures.

When discharge modeling, we used the obtained earlier expression which describes dependence of the mixture ionization coefficient on temperature. When there was a thin insulating film on the cathode the model took into account that positive charges are accumulated on its surface during the discharge. They generate an electric field in the film sufficient for the field emission of electrons from the metal substrate of the electrode into the insulator and some of them can overcome the potential barrier at the film outer boundary and go out in the discharge volume improving emission characteristics of the cathode.

Calculations showed that at a temperature decrease the electric field strengthes in the discharge gap and the voltage in it are increased due to reduction of the saturated mercury vapor density in the mixture followed by the decrease of its ionization coefficient. Existence of a thin insulating film on the cathode surface results in an increase of the cathode effective secondary electron emission yield which compensates the reduction of the mixture ionization coefficient value.

The results of discharge characteristics modeling demonstrate that in case of the cathode with an insulating film the discharge ignition becomes possible at a lower inter-electrode voltage. This ensures outdoor mercury lamp turning on at a reduced supply voltage and increases its reliability under low ambient temperatures.

Keywords: mercury illuminating lamp, low-current gas discharge, insulating film on cathode, field electron emission, discharge ignition voltage.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-7-13

Address for correspondence:
V.I. Kristya
Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch,
Bazhenov str., 2, Kaluga 248000, Russia
e-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru
For citation:
G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya, P. Żukovski.
Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode
Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps
at Low Ambient Temperatures.
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 1, pp. 7–13.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-7-13

УДК 537.525:621.327.53

Моделирование влияния тонкой диэлектрической пленки на поверхности электрода на зажигание разряда в ртутных осветительных лампах при низких температурах окружающей среды

Г.Г. Бондаренко¹, М.Р. Фишер², В.И. Кристя², П. Жуковский³

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, 20, г. Москва 101000, Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,

Калужский филиал,

ул. Баженова, 2, г. Калуга 248000, Россия

³Люблинский технологический университет,

ул. Надбыстрицкая 38А, г. Люблин 20-618, Польша

Поступила 17.12.2018 Принята к печати 28.02.2019

Смесь аргона и паров ртути с зависящим от температуры составом используется в качестве рабочего газа в различных типах газоразрядных осветительных ламп. Целью данной работы являлось построение модели слаботочного разряда в смеси аргон-ртуть при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки, а также определение ее влияния на напряжение зажигания разряда при низкой температуре окружающей среды.

При моделировании разряда мы использовали полученное ранее выражение, описывающее зависимость ионизационного коэффициента рассматриваемой смеси от температуры. В случае наличия на катоде тонкой диэлектрической пленки в модели учитывали, что в разряде на ее поверхности накапливаются положительные заряды. Они создают в пленке электрическое поле, достаточное для возникновения полевой эмиссии электронов из металлической подложки электрода в диэлектрик, часть из которых может преодолевать потенциальный барьер на внешней границе пленки и выходить в разрядный объем, улучшая эмиссионные характеристики катода.

Расчеты показали, что при снижении температуры происходит увеличение напряженности электрического поля в разрядном промежутке и напряжения на нем, обусловленное уменьшением концентрации насыщенных паров ртути в смеси, а следовательно, и ее ионизационного коэффициента. Наличие же тонкой диэлектрической пленки на поверхности катода может приводить, вследствие существования полевой эмиссии электронов в пленку, к увеличению эффективного коэффициента электронной эмиссии катода, компенсирующему снижение величины ионизационного коэффициента.

Представленные результаты моделирования характеристик разряда демонстрируют, что в случае катода с диэлектрической пленкой становится возможным возникновение разряда при более низком межэлектродном напряжении. Это обеспечивает зажигание лампы наружного освещения при меньшем напряжении питающей сети и повышает ее надежность в условиях низких температур.

Ключевые слова: ртутная осветительная лампа, слаботочный газовый разряд, диэлектрическая пленка на катоде, полевая электронная эмиссия, напряжение зажигания разряда.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-7-13	
Адрес для переписки: В.И. Кристя Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, ул. Баженова, 2, г. Калуга 248000, Россия e-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru	Address for correspondence: V.I. Kristya Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Bazhenov str., 2, Kaluga 248000, Russia e-mail: kristya@bmstu-kaluga.ru
Для цитирования: G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya, P. Żukovski. Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures. Приборы и методы измерений. 2019. – T. 10, No 1. – C. 7–13. DOI: 10. 21122/2220.9506-2019-10-1-7-13.	<i>For citation:</i> G.G. Bondarenko, M.R. Fisher, V.I. Kristya, P. Żukovski. Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures. <i>Devices and Methods of Measurements</i> . 2019, vol. 10, no. 1, pp. 7–13. DOI: 10.21122/2220.9506-2019-10-1-7-13.

Introduction

Arc illuminating lamps are nowadays a widespread type of gas discharge devices in which a mixture of argon with fixed density and mercury vapor with the density depending on temperature is often used as the background gas [1-5]. After the lamp turning on the low-current discharge is initiated in it which then transits into the glow and arc modes [6].

A lamp important characteristic is the discharge ignition voltage which equals to the minimum potential difference between the electrodes at which the gas breakdown occurs in the inter-electrode gap. Its reduction results in decrease of the lamp energy consumption and also in increase of its reliability and service time [7]. Value of the ignition voltage is determined by the processes of electron emission from the lamp cathode and ionization of the background gas in the discharge volume. In an argonmercury mixture, along with the direct ionization of atoms by electrons, also ionization of mercury atoms in collisions with excited argon ones (the Penning reaction) can considerably contribute [4, 8, 9]. This leads to an increase of the ignition voltage of outdoor lamps under a reduction of the ambient temperature due to a decrease of the mercury vapor content in the mixture. As a result, the supply voltage can become insufficient for mixture ignition.

However, when a thin insulating film exists on the cathode surface, positive charges are accumulated on it during the discharge. They generate an electric field in the insulator sufficient for the field emission of electrons from the electrode metal substrate into the film [10, 11]. The emitted electrons are accelerated by the field in the film conduction band and a fraction of them can overcome the potential barrier at the film outer surface and go out into the discharge volume increasing the emission characteristics of the electrode. Therefore a method of reduction of the discharge ignition voltage consists in formation of an insulating layer with thickness 10^1-10^2 nm on the lamp metal electrodes surfaces.

Influence of field electron emission from the metal substrate into the insulating film on the cathode emission properties and the discharge ignition voltage was investigated in [12]. It was shown there that this influence was determined completely by the film emission efficiency δ_f equal to the fraction of electrons emitted from the substrate, which goes out of the film into the discharge. But only fixed δ_f magnitudes of about 0.1 were used in [12] whereas

in real lamps its value depends on the film thickness and the electric field strength in it, determined by the discharge conditions [13, 14].

In this work a model of the low-current discharge in an argon-mercury mixture under the presence of a thin insulating film formed at the cathode is developed. An analytical expression for the film emission efficiency δ_f obtained in [14] is used. Dependence of δ_f on the background gas temperature in the low-current discharge in argon-mercury mixture is calculated. It is shown that existence of an insulating film can result in a considerable reduction of the discharge ignition voltage at low temperatures.

Model of the low-current discharge

Let the voltage sufficient for arising of the lowcurrent gas discharge to be applied to the discharge gap (length *d*) between the flat metal cathode covered with a thin insulating film (thickness H_f) and the metal anode (see Figure 1). The discharge current density *j* is determined by the equation of the discharge circuit:

$$U_d + U_f + RSj = U_0, (1)$$

where $U_d = E_d d$ and $U_f = E_f H_f$ are the voltage drops in the discharge gap and in the insulating film, respectively, E_d and E_f are the electric field strength values in them, S is the electrode surface area occupied by the discharge, U_0 is the external applied voltage, R is the ballast resistor which value is large enough to ensure a small value of j at which the discharge is low-current one [15].



Figure 1 – Schematic of the discharge geometry

Under the current flow in the discharge, bombardment of the cathode by ions proceeds and positive charges are accumulated on the film surface, which generate strong electric field in the film. When its strength E_f reaches value of $\approx 10^8$ V m⁻¹ the field electron emission from the cathode metal substrate into the film starts with the macroscopic current density determined by the Fowler-Nordheim equation [14, 16]:

$$j_f(E_f) = \frac{as_f E_f^2}{t^2(y_0)(\varphi_m - \chi_d)} \exp\left(-\frac{bv(y_0)(m^*/m)^{1/2}}{E_f}(\varphi_m - \chi_d)^{3/2}\right), (2)$$

where
$$v^2(y_0) = 1 - y_0^2 + (1/3) y_0^2 \ln y_0;$$

 $t^2(y_0) = 1 + (1/9) y_0^2 (1 - \ln y_0); y_0 = c \sqrt{E_f} / (\varphi_m - \chi_d);$

 $a = 1.541 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{eV} \cdot \text{V}^{-2}; b = 6.831 \cdot 10^9 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{eV}^{-3/2};$ $c = 3.795 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{V}^{-1/2}; \varphi_m$ is the metal substrate work function; χ_d is the film material electronic affinity; *m* and *m** are magnitudes of the electron mass in vacuum and in insulator, respectively. Here $E_f = \beta U_f / \varepsilon_f H_f$ [17]; β is the electric field enhancement factor on the relief elements of the metal-insulator boundary; s_f is the fraction of the boundary surface near the relief tops from which the field enhancement on them; ε_f is the high-frequency permittivity of the film material.

Value of E_f can be found from the condition of equality of the macroscopic current density j_f of the field electron emission from the cathode substrate into the film and the discharge current density j, i. e. from equation:

$$j_f\left(E_f\right) = j. \tag{3}$$

Electrons emitted into the film are accelerated by the electric field and decelerated in collisions with phonons [13, 14]. When they reach the film outer boundary a fraction δ_f of them goes out of the film into the discharge increasing the cathode effective secondary electron emission yield γ_{eff} , which equals to the average number of electrons emitted from the surface per an incident ion. Value of the film emission efficiency is determined by an expression [14]:

$$\delta_f = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_e}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_0^n}{n!\lambda_e^n} \left(1 + \frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right) \exp\left(-\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_d}\right), \quad (4)$$

where $H_0 = H_f - H_t$; $\varepsilon_{en} = e E_f H_f - e \varphi_m - n \Delta \varepsilon$;

$$\varepsilon_d = \hbar e E_f / 2 \sqrt{2 \, m^* (\varphi_m - \chi_d)} \, t(y_0);$$

 H_t is the tunneling length of an electron with the initial energy about the Fermi energy ε_F of the cathode metal substrate; $\Delta \varepsilon$ is the energy lost by an electron in each collision with a phonon in the insulator; λ_e is the average electron path length between collisions

with phonons in the direction perpendicular to the cathode surface; $\hbar = h/2\pi$, *h* is the Planck constant; *e* is the electron charge magnitude.

In the gas discharge, a substantial fraction of electrons emitted from the cathode surface returns to it due to scattering by the background gas atoms and only their fraction f_{es} goes into the discharge volume. Therefore the real film emission efficiency in the discharge equals to $\delta_{fe} = f_{es} \delta_f [15]$:

$$f_{es} = 1/(1+\overline{v}/4w_e),$$

where \overline{v} is the average velocity of electrons emitted from the cathode; w_e is the electron drift velocity in the gas.

As a result the cathode effective secondary electron emission yield is determined by expression [14]:

$$\gamma_{eff} = \left(f_{es} \gamma_i + \delta_{fe} \right) / \left(1 - \delta_{fe} \right), \tag{5}$$

where γ_i is the cathode ion-electron emission yield.

The condition of low-current discharge selfsustaining in the inter-electrode gap is [6]:

$$\alpha (E_d) d = \ln (1 + 1/\gamma_{eff}), \qquad (6)$$

where $\alpha(E_d)$ is the ionization coefficient of the background gas equal to the average number of ionizations of its atoms by an electron per a unit length.

For the argon-mercury mixture $\alpha(E_d)$ value in wide ranges of variation of temperature *T* and the electric field strength E_d it is determined by expression [18]:

$$\alpha(E_d) = A(N)n\exp(-B(N)\sqrt{n/E_d}), \qquad (7)$$

where $A(N) = 0.18N^3 + 5.84N^2 + 54.45N + 209.20;$

$$B(N) = 0.08N^3 + 2.50N^2 + 22.28N + 90.40;$$

$$N = \ln\left(n_{\mathrm{Hg}}(T)/n\right), \quad n = n_{\mathrm{Ar}} + n_{\mathrm{Hg}}(T);$$

 $n_{\rm Ar}$ and $n_{\rm Hg}(T)$ are the argon and mercury vapor densities, respectively.

Equations (1)–(7) form a system for the lowcurrent discharge characteristics in the argon-mercury mixture, including its ignition voltage $U_t = U_d + U_f$, when a thin insulating film covers the cathode, as well as under it absence (at $H_f = 0$ and $\delta_f = 0$).

Results of modeling

Calculations were performed for the discharge gap of length $d = 2 \cdot 10^{-3}$ m filled with the mixture of argon with density $n_{\rm Ar} = 6.57 \cdot 10^{23}$ m⁻³ corresponding to its pressure 2660 Pa at

temperature 20 °C and saturated mercury vapor, which density grows rapidly with temperature *T* as it is shown in Figure 2 [18]. The cathode was considered to be aluminum without an insulating film on the surface or with the insulating Al₂O₃ film of thickness $H_f = 16$ nm. The following parameter values were used [13, 14]: $\varphi_m = 4 \text{ eV}$; $\chi_d = 2 \text{ eV}$; $\varepsilon_f = 3$; $\beta = 3.8$; $m_e^* = m_e$; $\Delta \varepsilon = 0.125 \text{ eV}$; $\lambda_e = 0.3 \text{ nm}$; $s_f = 10^{-3}$; $\gamma_i = 0.03$. The ballast resistor ensured the discharge current density of about 10^{-5} Am^{-2} , i. e. the discharge was low-current [15].



Figure 2 – Relative saturated mercury vapor content in the mixture as a function of temperature [18]

The calculated dependences of discharge characteristics on the mixture temperature are presented in Figures 3–5. It follows from them that in case of cathode without the film temperature reduction from +10 °C to -20 °C (typical for northern countries in winter time), the electric field strength E_d value increases, whereas the discharge current density decreases. This results in discharge ignition voltage U_d increase by value of about 50 V which is in an agreement with experimental data [18]. At a temperature decrease below -20 °C the discharge characteristics do not change, because the mercury content in the mixture becomes negligibly small and the discharge burns in practically pure argon.



Figure 3 – The discharge current density as a function of temperature for the cathode with insulating film (solid line) and without the film (dashed line)



Figure 4 – The cathode effective secondary electron emission yield as a function of temperature. Designations are the same as in Figure 3



Figure 5 – The discharge ignition voltage as a function of temperature. Designations are the same as in Figure 3. Points are experimental data [19] for the cathode without the film

Under the presence of an insulating film on the cathode a contribution to its effective secondary electron emission yield $\gamma_{\mbox{\tiny eff}}$ along with the ionelectron emission makes the field electron emission from the metal substrate into the insulating film. Therefore, value of $\gamma_{e\!f\!f}$ exceeds its value for the cathode without the film considerably. Hence, fulfillment of the discharge sustaining condition (6) becomes possible at a reduced value of the ionization coefficient of the background gas, i. e. at lower electric field strength in it and, consequently, at lower voltage U_t between the electrodes. It can be seen in Figure 5 that the decrease of U_{i} due to the field electron emission from the cathode substrate is of about 20 V at low temperatures which facilitates the discharge ignition in the arc illuminating lamp under such conditions.

Conclusion

A model of low-current discharge in the argonmercury mixture when a thin insulating film exists on the cathode surface is developed in the paper. It takes into account the ion-electron emission from the cathode surface, and the field electron emission from the cathode metal substrate into the film, caused by the strong electric field generated in the cathode during the discharge. Using this model dependences of the discharge characteristics on the mixture temperature are calculated.

It is shown that because the saturated mercury vapor density decreases with temperature rapidly, a reduction of the mixture ionization coefficient also takes place. Therefore, the electric field strength in the discharge gap and the voltage drop across it are increased which can prevent the discharge ignition in the lamp at low ambient temperatures. When the cathode surface is covered with a thin insulating film the field electron emission from the cathode metal substrate increases the cathode effective secondary electron emission yield. As a result, the discharge ignition becomes possible at lower value of the ionization coefficient of the background gas and, consequently, at a lower voltage drop between the electrodes. This ensures the discharge ignition under smaller supply voltage values and increases reliability of mercury lamp operation at low ambient temperatures(typical for the northern countries in winter time) and under instability of the supply network voltage.

Acknowledgments

This work was performed in frameworks of the program «Organization of Scientific Researches» of the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education in Bauman Moscow State Technical University (project 3.8408.2017/6.7) and was supported financially by the Russian Foundation for Basic Researches and the Kaluga Region Government (project 18-42-400001).

Support from the Basic Research Program of National Research University «Higher School of Economics» is gratefully acknowledged.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания «Организация проведения научных исследований» Минобрнауки РФ в МГТУ имени Н.Э. Баумана (проект 3.8408.2017/6.7) при финансовой поддержке РФФИ и правительства Калужской области (проект 18-42-400001), а также в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

References

1. Flesch P. Light and light sources: High-intensity discharge lamps. Berlin, Springer, 2006, p. 344.

2. Zissis G., Kitsinelis S. State of art on the science and technology of electrical light sources: from the past to the future. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, vol. 42, no. 17, pp. 173001.

DOI: 10.1088/0022-3727/42/17/173001

3. Schwieger J., Baumann B., Wolff M., Manders F., Suijker J. Backcoupling of acoustic streaming on the temperature field inside high-intensity discharge lamps. *J. Phys.: Conf. Series*, 2015, vol. 655, pp. 012045. **DOI:** 10.1088/1742-6596/655/1/012045

4. Langer R., Garner R., Paul I., Horn S., Tidecks R. Cold starting of fluorescent lamps – part I: a description of the transient regime. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 76, no. 1, pp. 10802. **DOI:** 10.1051/epjap/2016160277

5. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O., Żukovski P. Simulation of cathode surface sputtering by ions and fast atoms in Townsend discharge in argon-mercury mixture with temperature-dependent composition. *Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 227–233.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-3-227-233

6. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. Hoboken, New Jersey, Wiley-Interscience, 2005, p. 756.

7. Hadrath S., Beck M., Garner R.C., Lieder G., Ehlbeck J. Determination of absolute Ba densities during dimming operation of fluorescent lamps by laser-induced fluorescence measurements. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, no. 1, pp. 163–167.

DOI: 10.1088/0022-3727/40/1/009

8. Brok W.J.M., Gendre M.F., van der Mullen J.J.A.M. Model study of DC ignition of fluorescent tubes. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, no. 1, pp. 156–162. **DOI:** 10.1088/0022-3727/40/1/008

9. Sobota A., van den Bos R.A.J.M., Kroesen G., Manders F. Transition between breakdown regimes in a temperature-dependent mixture of argon and mercury using 100 kHz excitation. *J. Appl. Phys.*, 2013, vol. 113, no. 4, pp. 043308. **DOI:** 10.1063/1.4789598

10. Lee M.-B., Hahm S.-H., Lee J.-H., Song Y.-H. Emission behavior of nm-thick Al₂O₃ film-based planar cold cathodes for electronic cooling. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol. 86, no. 12, pp. 123511.

DOI: 10.1063/1.1894593

11. Stamenković S.N., Marković V.Lj., Gocić S.R., Jovanović A.P. Influence of different cathode surfaces on the breakdown time delay in neon DC glow discharge. *Vacuum*, 2013, vol. 89, pp. 62–66. **DOI:** 10.1016/j.vacuum.2012.09.010 12. Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I. Modeling of the effect of temperature and field-induced electron emission from the cathode with a thin insulating film on the Townsend discharge ignition voltage in argonmercury mixture. *Vacuum*, 2016, vol. 129, pp. 188–191. **DOI:** 10.1016/j.vacuum.2016.01.008

13. Suzuki M., Sagawa M., Kusunoki T., Nishimura E., Ikeda M., Tsuji K. Enhancing electron-emission efficiency of MIM tunneling cathodes by reducing insulator trap density. *IEEE Trans.*: *ED*, 2012, vol. 59, no. 8, pp. 2256–2262.

DOI: 10.1109/TED.2012.2197625

14. Bondarenko G.G., Kristya V.I., Savichkin D.O. Modeling of the effect of field electron emission from the cathode with a thin insulating film on its emission efficiency in gas discharge plasma. *Vacuum*, 2018, vol. 149, pp. 114– 117. **DOI:** 10.1016/j.vacuum.2017.12.028

15. Arslanbekov R.R., Kolobov V.I. Two-dimensional simulations of the transition from Townsend to glow discharge and subnormal oscillations. *J. Phys. D:*

Appl. Phys., 2003, vol. 36, no. 23, pp. 2986–2994. **DOI:**10.1088/0022-3727/36/23/020

16. Forbes R.G. Simple good approximations for the special elliptic functions in standard Fowler–Nordheim tunneling theory for a Schottky–Nordheim barrier. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, no. 11, pp. 113122. **DOI:**10.1063/1.2354582

17. Xu N.S., Chen J., Deng S.Z. Physical origin of nonlinearity in the Fowler-Nordheim plot of field-induced emission from amorphous diamond films: Thermionic emission to field emission. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, vol. 76, no. 17, pp. 2463. **DOI:** 10.1063/1.126377

18. Bondarenko G.G., Dubinina M.S., Fisher M.R., Kristya V.I. Calculation of the ionization coefficient in the Townsend discharge in the mixture of argon and mercury vapors with temperature-dependent composition. *Russ. Phys. J.*, 2018, vol. 60, no. 12, pp. 2105–2110. **DOI:** 10.1007/s11182-018-1332-7

19. Waymouth J.F. Electric discharge lamps. Cambridge, MIT Press, 1971, 352 p.

Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals

K.N. Gorbachenya¹, R.V. Deineka¹, V.E. Kisel¹, A.S. Yasukevich¹, A.N. Shekhovtsov², M.B. Kosmyna², N.V. Kuleshov¹

¹Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Nezavisimosti Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²Institute for Single Crystals, NAS of Ukraine, Nauki Ave., 60, Kharkov 61072, Ukraine

Received 06.12.2018 Accepted for publication 04.02.2019

Abstract

The search for new crystalline host materials for the usage in lasers emitting in the eye-safe spectral range of $1.5-1.6 \mu m$ is an important task. The aim of this work was to study the growth technique, spectroscopic properties and laser characteristics of new active media – crystals Er^{3+} , Yb^{3+} :Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd).

Calcium-yttrium $Er^{3+}, Yb^{3+}: Ca_3Y_2(BO_3)_4$ (CYB) and calcium-gadolinium $Er^{3+}, Yb^{3+}: Ca_3Gd_2(BO_3)_4$ (CGB) oxoborate crystals co-doped with erbium and ytterbium ions were investigated. Polarized absorption and emission cross-section spectra were determined. The lifetimes of ${}^{4}I_{11/2}$ and ${}^{4}I_{13/2}$ energy levels of Er^{3+} ions were measured and ytterbium-erbium energy transfer efficiencies were estimated. The calculation of the gain cross-section spectra was performed. By using of $Er^{3+}, Yb^{3+}: Ca_3RE_2(BO_3)_4$ (RE=Y, Gd) crystals the laser performance was realized, for the first time to the best of our knowledge. The laser characteristics were studied in a quasi-CW (QCW) laser operation.

The wide band with a peak at the wavelength of 976 nm is observed in the absorption spectra of both crystals. This peak coincides with the emission wavelength of the pump laser diodes for Yb-doped active media. The maximum value of absorption cross-section was 1.7×10^{-20} cm² for polarization *E*//*b* for both crystals. The lifetimes of the upper laser level ⁴I_{13/2} of Er³⁺ ions were $580 \pm 30 \ \mu s$ and $550 \pm 30 \ \mu s$ for Er,Yb:CYB and Er,Yb:CGB crystals, respectively. The energy transfer efficiencies from ytterbium to erbium ions for an Er,Yb:CYB and Er,Yb:CGB crystal were 94 % and 96 %, respectively. According to gain spectrum of the Er,Yb:CYB crystal the gain band peak is centered at the wavelength of 1530 nm. The maximum QCW output power was 0.5 W with slope efficiency of 13 % regarding to absorbed pump power for an Er,Yb: CYB crystal. The laser beam parameter M² did not exceed < 1.5.

Based on the obtained results, it can be concluded that these crystals are promising active media for lasers emitting in the spectral range of $1.5-1.6 \mu m$ for the usage in laser rangefinder and laser-induced breakdown spectroscopy systems, and LIDARs.

Keywords: erbium, ytterbium, borate crystals, spectroscopy, laser performance.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
К.Н. Горбаченя	K.N. Gorbachenya
Центр оптических материалов и технологий, Белорусский	Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National
национальный технический университет,	Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby@bntu.by	e-mail: gorby@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich,	K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich,
A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov.	A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov.
Er, Yb:Ca ₂ RE ₂ (BO ₂) ₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals.	Er, Yb:Ca ₂ RE ₂ (BO ₂) ₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. C. 14–22.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 14–22.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22

Кристаллы Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) – новые среды для лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1,5 мкм

К.Н. Горбаченя¹, Р.В. Дейнека¹, В.Э. Кисель¹, А.С. Ясюкевич¹, А.Н. Шеховцов², М.Б. Космына², Н.В. Кулешов¹

¹Центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь ²Институт монокристаллов Национальной академии наук Украины, пр-т Науки, 60, г. Харьков 61072, Украина

Поступила 06.12.2018 Принята к печати 04.02.2019

Поиск новых кристаллических матриц для применения в лазерах, излучающих в условно безопасном для глаз спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм, является актуальной задачей. Целью данной работы являлось изучение технологии роста, спектроскопических свойств и генерационных характеристик новых активных сред – кристаллов Er³⁺, Yb³⁺:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd).

В качестве исследуемых образцов использовались кристаллы кальций-иттриевого Er^{3+} , Yb^{3+} : $Ca_3Y_2(BO_3)_4$ (CYB) и кальций-гадолиниевого Er^{3+} , Yb^{3+} : $Ca_3Gd_2(BO_3)_4$ (CGB) оксоборатов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. В результате определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания в поляризованном свете. Определены времена жизни энергетических уровней ${}^{4I}_{11/2}$ и ${}^{4I}_{13/2}$ иона эрбия, а также проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттебрия к ионам эрбия. Выполнен расчет спектров поперечных сечений усиления. Впервые с использованием кристаллов реализована лазерная генерация, изучены генерационные характеристики в квазинепрерывном режиме генерации.

В спектрах поглощения для обоих кристаллов наблюдается полоса с пиком на длине волны 976 нм, что согласуется с длиной волны испускания лазерных диодов, применяемых для накачки активных элементов с ионами Yb³⁺. Наибольшее значение поперечного сечения поглощения для обоих кристаллов составило $1,7 \times 10^{-20}$ см² для поляризации E//b на длине волны 976 нм. Время жизни верхнего лазерного уровня ${}^{4}I_{13/2}$ составило 580 ± 30 мкс и 550 ± 30 мкс для кристаллов Er,Yb:CYB и Er,Yb:CGB соответственно. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия составила 94 % для кристалла Er,Yb:CYB и 96 % для Er,Yb:CGB. Расчет спектра усиления для кристалла Er,Yb:CYB, показал что максимум полосы усиления находится на длине волны 1530 нм. Максимальное значение выходной мощности в квазинепрерывном режиме генерации составило 0,5 Вт при дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 13 % для кристалла Er,Yb:CYB, параметр распространения лазерного пучка M^2 не превышал 1,5.

На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что данные кристаллы являются перспективными активными средами для лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм, для применения в составе систем лазерной дальнометрии, лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии и лидаров.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, кристаллы боратов, спектроскопия, лазерная генерация.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
К.Н. Горбаченя	K.N. Gorbachenya
Центр оптических материалов и технологий, Белорусский	Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National
национальный технический университет,	Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby@bntu.by	e-mail: gorby@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich,	K.N. Gorbachenya, R.V. Deineka, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich,
A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov.	A.N. Shekhovtsov, M.B. Kosmyna, N.V. Kuleshov.
Er, Yb:Ca ₃ RE ₂ (BO ₃) ₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 μ m Laser Crystals.	Er, Yb:Ca ₃ RE ₂ (BO ₃) ₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. C. 14–22.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 14–22.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22

Introduction

The laser radiation in the spectral range of $1.5-1.6 \,\mu\text{m}$ is attractive for application in rangefinders and LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) systems [1] due to its eye-safety. This radiation is strongly absorbed in an eye's cornea and can not damage the sensitive retina. Also due to high transparency of the atmosphere $1.5-1.6 \,\mu\text{m}$ radiation is of great interest for application in LIDAR (Light Identification Detection and Ranging) systems [2]. Nowadays there are many laser sources emitting in this range, lasers based on Er^{3+} and Yb^{3+} co-doped materials are ones of the most widespread. The main requirements to erbium, ytterbium co-doped materials for achieving efficient laser operation in the spectral range $1.5-1.6 \,\mu\text{m}$ are the following [3]:

- efficient absorption of pump power by Yb³⁺ ions and further efficient energy transfer from ytterbium to erbium ions;

- fast non-radiative relaxation from ${}^{4}I_{11/2}$ energy level to ${}^{4}I_{13/2}$ energy level of Er3+ ions for minimization of losses deal with back energy transfer from erbium to ytterbium ions and upconversion transitions from the ${}^{4}I_{11/2}$ energy level to upper ones.

Nowadays REAl₂(BO₃)₄ oxoborate crystals are the leading E^{r3+} , Yb³⁺ co-doped crystalline laser materials, because they possess necessary spectroscopic properties required for efficient laser operation at near 1.5 µm [4–7]. However crystals with sizes not more than 20 × 10 × 10 mm³ can be grown only by top seed solution growth technique (TSSG) that is characterized with a long-term (about a month) growth period [8].

In the contrast to Er,Yb:REAl₂(BO₃)₄ crystals, homogeneous and free of impurity phases and scattering centers Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ ones with dimensions up to $Ø 20 \times 80$ mm³ can be grown by the well managed Czochralski method. To date several articles devoted to the crystal growth and spectroscopy investigation of Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals were published. Moreover, polarized absorption and emission cross-section spectra, energy transfer efficiency as well as laser performance was not reported. In this paper we demonstrate laser related spectroscopy and, for the first time to our knowledge, laser operation of Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals.

Experimental details

Crystal growth

 $CaCO_3$ (99.99 %), RE_2O_3 (99.99 %) (RE = Y, Gd), Er_2O_3 (99.99 %), Yb_2O_3 (99.99 %) and B_2O_3 (99.95 %) compounds were used as reagents for solid state synthesis of the charge. The stoichiometric mixture of the initial reagents was placed into a platinum crucible. The mixture was heated at the rate of 50 °C/h to 110 °C, 230 °C, 450 °C and 750 °C and kept for 10 h at each temperature. The compound formation was carried out according to reaction:

$$3CaCO_3 + 0.88RE_2O_3 + 0.02Er_2O_3 + 0.1Yb_2O_3 + 2B_2O_3 \rightarrow Ca_3RE_{1.76}Yb_0.2Er_{0.04}(BO_3)_4 + 3CO_2\uparrow.$$

The obtained material was finely ground. The charge was placed in Ir crucible for crystal growth. Er,Yb co-doped Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals were grown by the Czochralski method using an automated and equipped with a weight control system «Kristall 3M» puller. The growth process was carried out in inert (argon) atmosphere. The pulling and rotation rates were 1.5 mm/h and 20 rpm, respectively. The axial temperature gradient at the crystal-melt interface was 50 °C/cm. The crystals were grown along the crystallographic axis [001]. No impurity phases and gas bubble inclusions were detected [9]. Boules of Er,Yb:Ca₃Re₂(BO₃)₄ (Re=Y, Gd) crystals of high optical quality were produced with 20 mm in the diameter and 80 mm in the length (Figure 1).





а

b

Figure 1 – The $Er,Yb:Ca_3Y_2(BO_3)_4$ (a) and $Er,Yb:Ca_3Gd_2(BO_3)_4$ (b) crystals

Spectroscopic technique

Twopolishedcubescutfrom $Er(2 \text{ at.}\%), Yb(10 \text{ at.}\%): Ca_3Y_2(BO_3)_4$ and $Er(2 \text{ at.}\%), Yb(10 \text{ at.}\%): Ca_3Gd_2(BO_3)_4$ crystals with

dimensions of $5 \times 5 \times 5$ mm³ oriented along the a, b and c crystallographic axes were used to record polarized absorption spectra. The room-temperature polarized absorption spectra were recorded with *Varian Cary* 5000 *UV-Vis-NIR* spectrophotometer in the wavelength ranges from 850 to 1100 nm and 1400–1650 nm.

Lifetime measurements were performed using optical parametric oscillator based on the β -Ba₂B₂O₄ crystal and pumped by the third harmonic of a Q-switched Nd:YAG laser. The luminescence radiation was detected at 1.5 µm using a monochromator, fast InGaAs photodiode and 500 MHz digital oscilloscope. To prevent reabsorption caused by significant overlap of the absorption and emission bands, measurements of Yb³⁺ luminescence kinetics were performed using with a fine powder of the crystals immersed in glycerin [11].

The energy transfer efficiency was measured by estimation of the ${}^{2}F_{5/2}$ level lifetime shortening in Er,Yb-codoped crystals and Yb-single doped crystal according to the formula (1) [12]:

$$\eta = k / \tau^{-1} = \tau (1 / \tau - 1 / \tau_0), \qquad (1)$$

where *k* is the energy transfer rate; τ is the ytterbium ${}^{2}F_{5/2}$ level lifetime in Er,Yb-codoped crystal; τ_{0} is the ytterbium ${}^{2}F_{5/2}$ level lifetime in Yb single-doped crystal.

The stimulated emission-cross section spectra in the spectral range 1450–1650 nm were calculated by the integral reciprocity method (2) [13] using the calculated absorption cross-section spectra and radiative lifetime of ${}^{4}I_{13/2}$ energy level of Er^{3+} ions presented in [14]:

$$\sigma_{em}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3\exp(-hc/(kT\lambda))}{8\pi n^{2}\tau_{rad}c\sum_{\chi}\int\lambda^{-4}\sigma_{abs}^{\gamma}(\lambda)\exp(-hc/(kT\lambda))d\lambda}\sigma_{abs}^{\alpha}(\lambda), (2)$$

where τ_{rad} is the radiative lifetime of an active center (Er³⁺); *c* is the speed of light in vacuum; α and γ denote light polarization; *h* and *k* are the Planck's and Boltzman's constants, respectively; *T* is a host crystal temperature; *n* is the refractive index of the crystal and σ_{abs} is the ground state absorption cross-section.

The gain cross-section spectra $g(\lambda)$ were calculated for different inversion parameters β by using the following equation (3):

$$g(\lambda) = \beta \sigma_{em}(\lambda) - (1 - \beta)\sigma_{abs}(\lambda), \qquad (3)$$

where $\beta = N_{ex}/N_{tot}$ is the ratio of the population of excited Er^{3+} ions manifold to the total erbium ions concentration.

Setup for laser experiments

The laser performance of the Er, Yb: $Ca_2Re_2(BO_2)_4$ (Re=Y,Gd) crystals was investigated in Z-shaped cavity (Figure 2). The 2-mm-thick antireflection coated for both pump and lasing wavelengths a-cut $Er(2 \text{ at.}\%), Yb(10 \text{ at.}\%): Ca_3 Re_2(BO_3)_4$ crystal was wrapped in indium foil for good thermal contact and mounted between two copper slabs with the hole in the center to permit passing of pump and laser beams. The temperature of an active element was kept at 20 °C. As a pump source a 976 nm fibercoupled laser diode (\emptyset 105 µm, NA = 0.22) was used. To minimize thermal effects inside the crystal the quasi-continuous wave (QCW) mode of laser diode operation with a duty cycle of 10 % was chosen. After passing lens system the pump beam was focused into $\sim 100 \,\mu\text{m}$ spot (1/e² intensity) inside the crystal. The cavity-mode diameter at the active element was close to the pump beam waist. Three output couplers (OC's) with different transmittances were used during laser experiments. The experimental setup is shown in Figure 2.



Figure 2 – Experimental setup for laser experiments

Result and discussion

Spectroscopy

The room-temperature polarized absorption cross-section spectra of the Er,Yb:Ca₃Y₂(BO₃)₄ (CYB) and Er,Yb:Ca₃Gd₂(BO₃)₄ (CGB) crystals in the spectral range of 850–1100 nm are shown in Figures 3*a* and 3*b*, respectively. The peak absorption cross-sections around 976 nm (the wavelength is close to emission wavelengths of commercial InGaAs laser diodes) corresponding to the transitions of ${}^{2}F_{7/2} \rightarrow {}^{2}F_{5/2}$ of Yb³⁺ ions and ${}^{4}I_{15/2} \rightarrow {}^{4}I_{11/2}$ of Er³⁺ ions, for both crystals is around 1.7×10^{-20} cm² for polarization E // b. Thus, the pump beam polarization corresponded to the *b* axis of the crystal will be preferable. The broad and smooth absorption band corresponding to transition of ${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$ of Er^{3+} ions is observed in the spectral range of 1400–1650 nm. The maximum absorption cross-section for Er,Yb:CYB crystal in the spectral region of 1400–1650 nm does not exceed 0.6×10^{-20} cm² at the wavelength of 1530 nm (Figure 4).



Figure 3 – Polarized absorption cross-section spectra of Er,Yb:CYB (*a*) and Er,Yb:CGB (*b*) crystals at room temperature



Figure 4 – Polarized absorption cross-section spectra of $Er, Yb:Ca_3Y_2(BO_3)_4$ crystal in the spectral region of 1400–1650 nm

The decay curves of 1.5 μ m emission (${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$ transition of Er³⁺ ions) were single exponential

(Figure 5) for both crystals, and the luminescence decay times of the 4I13/2 energy level of Er3+ were measured to be about $580 \pm 30 \ \mu s$ and $550 \pm 30 \ \mu s$ for Er, Yb: CYB and Er, Yb: CGB crystals, respectively. Taking into account, that radiative lifetimes calculated from the Judd-Offelt analysis is 2.41 ms for Er, Yb:CYB crystal and 1.98 ms for Er, Yb:CGB crystal [13] the luminescence quantum yields of the ${}^{4}I_{13/2}$ energy level was estimated to be 24 % and 28 % for Er, Yb:CYB and Er, Yb:CGB crystals, respectively. Comparatively low luminescence quantum yields are explained by the high phonon energy of the oxoborate crystals, which result in a high non-radiative ${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$ transition probability. However, it should be mentioned, that obtained values is near three times higher to those obtained for Er, Yb:REAl₂(BO₂)₄ crystals (10 %) [5].



Figure 5 – Kinetics of luminescence decay of Er,Yb:CYB (*a*) and Er,Yb:CGB (*b*) crystals

The lifetime of the ${}^{4}I_{11/2}$ level of Er^{3+} ions was estimated in CYB and CGB crystals doped only Er^{3+} ions, because in Er-Yb co-doped crystals the process of back energy transfer from erbium to ytterbium distorts the measured lifetime of the level ${}^{4}I_{11/2}$. In erbium media, nonradiative relaxation to the ${}^{4}I_{13/2}$ level is the dominant process of emptying the ${}^{4}I_{11/2}$ level. Therefore, the time of emptying the ${}^{4}I_{11/2}$ level corresponds to the time of filling the ${}^{4}I_{13/2}$ level. Consequently, the task of estimating the lifetime of the ${}^{4}I_{11/2}$ level of the Er³⁺ ion in Er:CYB and Er:CGB crystals was to determine the ${}^{4}I_{13/2}$ energy level rising time. The lifetime of the ${}^{4}I_{11/2}$ energy level in Er:CYB and Er:CGB crystals did not exceed 120 ns (Figure 6) (for comparison, in phosphate glass with Er³⁺ ions it is 1–3 µs [15, 16]). The short lifetime of ${}^{4}I_{11/2}$ energy level enables fast non-radiative relaxation from ${}^{4}I_{11/2}$ energy level to ${}^{4}I_{13/2}$ energy level of Er³⁺ that leads to minimization of losses dealt with back energy transfer from erbium to ytterbium ions and up-conversion transitions from to ${}^{4}I_{11/2}$ energy level to upper ones.



Figure 6 – The rising part of luminescence kinetics curve from ${}^{4}I_{13/2}$ energy level of Er^{3+} in the region of about 1.5 μ m

The dependences of obtained lifetimes of ${}^{2}F_{5/2}$ energy level on different weight content of Yb(1 at.%):CYB and Yb(1 at.%):CGB crystalline powders in glycerin suspension are presented in Figure 7. With the decrease in weight content of crystalline powder in suspension the measured lifetimes also decreased. After considerable dilution of the powders and thus elimination of selftrapping effect the ytterbium lifetimes in Yb:CYB and Yb:CGB crystals were determined to be 680 ± 30 and $700\pm30 \,\mu$ s, respectively. The ${}^{2}F_{5/2}$ energy level lifetimes were measured to be $40\pm2 \,\mu$ s in Er(2 at.%),Yb(10 at.%):CGB crystal.

By using formula (1) the energy transfer efficiency in the Er:Yb:CYB crystal doped with 2 at.% Er³⁺ and 10 at.% Yb³⁺ was calculated to be about 94 %. Very close efficiency of 96 % was obtained for Er:Yb:CGB crystal. These results suggest that the almost all of absorbed energy can be efficiently transferred from ${}^{2}F_{5/2}$ energy level of Yb³⁺ ions to the ${}^{4}I_{11/2}$ energy level of Er³⁺ ions by nonradiative resonant energy-transfer process. It also

should be mentioned that energy transfer efficiencies in Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals are similar to those in REAl₂(BO₃)₄ oxoborate crystals [4, 5] and Er and Yb co-doped glass and more efficient than in vanadates and tungstates [17, 18].



Figure 7 – The ${}^{2}F_{5/2}$ energy level lifetimes of Yb(1 at.%):CYB (*a*) and Yb(1 at.%):CGB (*b*) crystalline powder in glycerin

The stimulated emission cross-section spectra of Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals in the spectral range of 1400–1650 nm are shown in Figure 8. The highest stimulated emission cross-sections of both crystals was found to be about 1.65×10^{-20} cm² at 1530 nm for polarization E//b. One can also note the low anisotropy of stimulated emission for Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals.

Taking into account the similarity of absorption and emission spectra of both crystals the gain cross-section spectra $g(\lambda)$ were calculated only for Er,Yb:CYB crystal for E//b polarization. The gain cross-section spectra of Er,Yb:CYB crystal for different inversion parameters β from 0.1 to 1 in the spectral range of 1400–1650 nm are shown in Figure 9. In accordance with presented spectra the maximum of gain band is centered at 1530 nm under $\beta > 0.3$, which causes the spectral position of laser emission.



Figure 8 – The stimulated emission cross-section spectra of Er,Yb:CYB (*a*) and Er,Yb:CGB (*b*) crystals



Figure 9 – The E//b gain cross-section spectra of the ${}^{4}I_{13/2} \rightarrow {}^{4}I_{15/2}$ transition of Er^{3+} ions in Er,Yb:CYB crystals in the spectral range of 1400–1650 nm

Laser performance of Er, Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ crystals

Input-output characteristics and laser output spectrum of QCW Er,Yb:CYB diode-pumped lasers are plotted in Figure 10 and Figure 11 respectively. The maximal peak output power of 0.5 W at 1530 nm with slope efficiency of 13 % was obtained for OC with transmittance of 1.3 % when absorbed pump power was 6.8 W. The laser threshold was about 2.5 W of absorbed pump power. The laser radiation was linearly polarized (E//b).



Figure 10 – Input-output characteristics of Er,Yb:CYB laser





Input-output characteristics of QCW Er,Yb:CGB laser are shown in Figure 12. The similar slope efficiencies with slightly lower output powers and higher thresholds were obtained in this case. The weak dependence of the slope efficiency from the OC's transmittance evidences low passive losses of the laser resonator.



Figure 12 – Input-output characteristics of Er,Yb:CGB laser

The maximal peak output power of 0.4 W was obtained at 1530 nm, slope efficiency was estimated to be 12 % for 1.3 % OC. It should be mentioned that the spatial profile of the output beam was TEM00 mode with $M^2 < 1.5$ during all laser experiments.

Conclusions

 $Ca_{3}RE_{2}(BO_{3})_{4}$ (RE=Y, Gd) crystals co-doped with Er and Yb ions were grown by Czochralski technique. The detailed investigation of the spectralluminescent properties of the Er, Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) crystals were performed. Diodepumped QCW laser operation of the Er:Yb:CYB and Er, Yb:CGB crystals was demonstrated, for the first time to our best knowledge. Maximal peak output power of 0.5 W with slope efficiency of 13 % was achieved at 1530 nm by using of Er,Yb:CYB crystal. The obtained characteristics indicate the promise of Er, Yb:CYB and Er, Yb:CGB crystals usage as active media of pulsed-pumped lasers emitting in the spectral range 1.5-1.6 µm for application in laser rangefinder, LIBS and LIDAR systems.

References

1. Myers M.J. LIBS system with compact fiber spectrometer, head mounted spectra display and hand held eye-safe erbium glass laser gun. *Proc. SPIE, Bellingham*, 2010, vol. 7578, pp. 7578–7582.

DOI: 10.1117/12.841901

2. Hecht J. Lidar for self-driving cars. *Optics and Photonics News*, 2018, vol. 29, pp. 26–35.

3. Burns P., Dawes J., Dekker P., Pipper J., Jiang H., Wang J. Optimization of Er,Yb:YCOB for cw laser operation. *IEEE J. Quantum Electron*, 2004, vol. 40, no. 11. – pp. 1575–1582. **DOI:** 10.1109/JQE.2004.834935

4. Tolstik Nikolai A., Kurilchik Sergey V., Kisel Victor E., Kuleshov Nikolay V., Maltsev Victor V., Pilipenko Oleg V., Koporulina Elizaveta V., Leonyuk Nikolai I. Efficient 1W continuous-wave diode-pumped Er,Yb:YAl(BO₃)₄ laser. *Opt. Lett.*, 2007, vol. 32, no. 22, pp. 3233–3235. **DOI:** 10.1364/OL.32.003233

5. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. Highly efficient continuous-wave diode-pumped Er, Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser. *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38(14), pp. 2446–2448. **DOI:** 10.1364/OL.38.002446

6. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. Eyesafe 1.55 μ m passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diodepumped laser. *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 5, pp. 918– 921. **DOI:** 10.1364/OL.41.000918 7. Yujin Chen, Yanfu Lin, Jianhua Huang, Xinghong Gong, Zundu Luo, Yidong Huang Spectroscopic and laser properties of Er^{3+} , $Yb^{3+}:LuAl_3(BO_3)_4$ crystal at 1.5-1.6 µm. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 13, pp. 13700–13707. **DOI:** 10.1364/OE.18.013700

8. Maltsev V.V., Koporulina E.V., Leonyuk N.I., Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V. Crystal growth of CW diode-pumped (Er³⁺,Yb³⁺):GdAl₃(BO₃)₄ laser material. *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 401, pp. 807–812.

DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.11.100

9. Gudzenko L.V., Kosmyna M.B., Shekhovtsov A.N., Paszkowicz W., Sulich A., Domagała J.Z., Popov P.A., Skrobov S.A. Crystal growth and glass-like thermal conductivity of $Ca_3RE_2(BO_3)_4$ (RE-Y, Gd, Nd) single crystals. *Crystals*, 2017, vol. 7:88, 9 p.

DOI: 10.3390/cryst7030088

10. Huang Jianhua, Chen Yujin, Lin Yanfu, Gong Xinghong, Luo Zundu, Huang Yidong High efficient 1.56 μ m laser operation of Czochralski grown Er:Yb:Sr₃Y₂(BO₃)₄ crystal. *Opt.Express*, 2008, vol. 16, no. 22, pp. 17243–17248. **DOI:** 10.1364/OE.16.017243

11. Sumida D.S., Fan T.Y. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media. *Opt. Lett.*, 1994, vol. 19, no. 17, pp. 1343–1345.

DOI: 10.1364/OL.19.001343

12. Denker B., Galagan B., Ivleva L., Osiko V., Sverchkov S., Voronina I., Hellstrom J.E., Karlsson G., Laurell F. Luminescent and laser properties of Yb,Eractivated GdCa₄ $O(BO_3)_3$ - a new crystal for eyesafe 1.5 micrometer lasers. *Appl. Phys. B.*, 2004, vol. 79, no. 5, pp. 577–581. **DOI:** 10.1007/s00340-004-1605-4

13. Yasyukevich A.S., Shcherbitskii V.G., Kisel V.E., Mandrik A.V., Kuleshov N.V. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2004, vol. 71, no. 2, pp. 202–208. **DOI:** 10.1023/B:JAPS.0000032875.04400.a0

14. Wei B., Zhang L.Z., Lin Z.B., Wang G.F. Optical transition probability of Er^{3+} ions in Er^{3+}/Yb^{3+} codoped $Ca_3Ln_2(BO_3)_4$ (Ln=Y, Gd, La) crystals. Materials Research Innovations 11, 2007, pp. 154–157.

DOI: 10.1179/143307507X225605

15. Levoshkin A., Petrov A., Montagne J.E. Highefficiency diode-pumped Q-switched Yb:Er:glass laser. *Optics Communications*, 2000, vol. 185, no. 4–6, pp. 399–405. **DOI:** 10.1016/S0030-4018(00)01012-9

16. Laporta P., Taccheo S., Longhia S., Svelto O., Svelto C. Erbium-ytterbium microlasers: optical properties and lasing characteristics. *Opt. Mater.*, 1999, vol. 11, no. 2–3, pp. 269–288.

DOI: 10.1016/S0925-3467(98)00049-4

17. Tolstik N.A., Troshin A.E., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosov T.A., Kupchenko M.I. Spectroscopy, continuous-wave and Q- switched diode-pumped laser operation of Er³⁺,Yb³⁺:YVO₄ crystal. *Appl. Phys. B.*, 2007, vol. 86, no. 2, pp. 275–278. **DOI:** 10.1007/s00340-006-2427-3

18. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Kornienko A.A., Dunina E.B., Hartung S., Huber G. Fluorescence dynamics, excited-state absorption, and stimulated emission of Er^{3+} in KY(WO₄)₂. *Journal of the Optical Society of Amerika B*, 1998, vol. 15, no. 3, pp. 1205–1212. **DOI:** 10.1364/JOSAB.15.001205

УДК 620.192.63

Устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно-космической техники

Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносновская

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия

Поступила 15.01.2018 Принята к печати 23.01.2019

Широкое применение криогенных топлив в аэрокосмической промышленности обуславливает необходимость дополнительной теплоизоляции топливных баков летательных аппаратов. При этом на теплоизолирующем слое в процессе эксплуатации может возникнуть статический заряд, что при утечке топлива может привести к взрыву. Для исключения подобных ситуаций на теплоизоляцию наносится антистатическое токопроводящее покрытие. Целью работы являлась разработка устройства дистанционного контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов, позволяющего оперативно находить и маркировать поврежденные участки.

Разработанная методика заключается в изменении электрической емкости между токопроводящим покрытием контролируемого объекта и сканирующим электродом. Она позволяет определять опасные с точки зрения искрообразования замкнутые по форме дефекты. Сформированы основные технические требования к устройству, а также обозначен требуемый минимальный размер контролируемого дефекта. Рассмотрены конструктивные особенности, необходимые для реализации устройства. Разработана структурная схема, на основе которой создан экспериментальный стенд емкостного контроля, основанный на мостовом методе измерений.

Представлены результаты конечно-разностного расчета электрического поля в структуре емкостного датчика при наличии дефекта, получена зависимость емкости датчика от его смещения над дефектным участком. Полученные экспериментальные данные подтвердили данные теоретических расчетов и корректность математической модели с точностью не хуже 5 %, абсолютная погрешность фиксации дефекта составляет ± 2 мм при скорости сканирования 0,02 м/с. Показано, что суммарная погрешность фиксации координат дефекта при различных положениях датчика воздушного зазора, температуры и скорости сканирования лежит в диапазоне 1,5–6,5 мм. Представленные в статье материалы позволяют повысить безопасность полетов за счет снижения вероятности искрообразования.

Ключевые слова: топливный бак, токопроводящее покрытие, дефекты, контроль, емкостной метод.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Adnac dua nananucuu:	Address for correspondence.
Б.В. Сквориов	B.V. Skyortsov
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева	Samara National Research University, Moskovskove shosse 34 Samara 443086 Russia
Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия e-mail: aps@ssau.ru	e-mail: aps@ssau.ru
Для цитирования:	For citation:
Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносновская.	B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy,
Устройство контроля качества токопроводящих покрытий	D.M. Zhivonosnovskaya.
элементов ракетно-космической техники.	[Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and
Приборы и методы измерений.	Space Technique Elements].
2019. – T. 10, № 1. – C. 23–31.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31	2019, vol. 10, no. 1, pp. 23-31 (in Russian).
	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and Space Technique Elements

B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy, D.M. Zhivonosnovskaya

Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, Samara 443086, Russia

Received 15.01.2018 Accepted for publication 23.01.2019

Abstract

The widespread use of cryogenic fuels in the aerospace industry necessitates additional thermal insulation of aircraft fuel tanks. At the same time a static charge may occur on the heat insulating layer during operation which can lead to an explosion if fuel leaks. To avoid such situations an antistatic conductive coating is applied to the insulation. The aim of the study is to develop a device for remote control of conductive coatings of aircraft fuel tanks which allows to quick find and mark damaged areas.

The developed method consists in changing the electrical capacitance between the conductive coating of the controlled object and the scanning electrode allowing to identify hazardous in terms of sparking closed shape defects. The basic technical requirements for the device were formed and the required minimum size of the monitored defect were indicated. The design features necessary for the implementation of the device were considered. A block diagram were developed on the basis of which an experimental bench for capacitive control were created which were is based on the bridge measurement method.

The article presents the results of the finite-difference calculation of the electric field in the structure of a capacitive sensor in the presence of a defect, the dependence of the capacitance of the sensor on its displacement over the defective area was also obtained. As the result of experimental studies the experimental data obtained confirmed the theoretical calculations and the correctness of the mathematical model with an accuracy of no worse than 5 %, the absolute error of fixing the defect ± 2 mm at a scanning speed of 0,02 m/s. Was shown that the total error of fixing the coordinates of the defect at different positions of the air gap sensor, temperature and scanning speed lies in the range of 1,5–6,5 mm. The materials presented in the article make it possible to increase flight safety by reducing the likelihood of sparking.

Keywords: fuel tank, conductive coating, defects, control, capacitive method.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Б.В. Скворцов	B.V. Skvortsov
Самарский национальный исследовательский университет	Samara National Research University,
имени академика С.П. Королева,	Moskovskoye shosse, 34, Samara 443086, Russia
Московское шоссе, 34, г. Самара 443086, Россия	e-mail: aps@ssau.ru
e-mail: aps@ssau.ru	
Для цитирования:	For citation:
Б.В. Скворцов, А.С. Самсонов, С.А. Борминский, Д.М. Живоносновская.	B.V. Skvortsov, A.S. Samsonov, S.A. Borminskiy,
Устройство контроля качества токопроводящих покрытий	D.M. Zhivonosnovskaya.
элементов ракетно-космической техники.	[Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and
Приборы и методы измерений.	Space Technique Elements].
2019. – T. 10, № 1. – C. 23–31.	Devices and Methods of Measurements.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-23-31	2019, vol. 10, no. 1, pp. 23–31 (in Russian).
	DOI: 10 21122/2220-9506-2019-10-1-23-31

Введение

Защита от статического электричества является одной из основных задач современной авиакосмической промышленности. Одной из зон риска накопления заряда являются топливные баки летательных аппаратов, так как при использовании криогенных топлив подразумевается наличие слоя теплоизоляции, имеющей большое удельное сопротивление. Для предотвращения накопления статического заряда в процессе эксплуатации на теплоизолирующий слой топливного бака наносится токопроводящее покрытие (ТПП), для защиты которого снаружи наносится слой краски. Согласно ГОСТу, для исключения воспламенения смеси водорода с воздухом необходимо металлизировать внешние неметаллические части конструкций с площадью поверхности более 0,02 м² [1]. В процессе эксплуатации и транспортировки бака целостность ТПП может быть нарушена. В таком случае в месте дефекта начнет накапливаться статический заряд, что при утечке топлива может привести к взрыву. Контроль качества токопроводящего слоя является важной задачей, которая из-за наличия лакокрасочного покрытия не может быть решена визуальными и контактами методами. Под качеством ТПП в данной статье понимается отсутствие замкнутых дефектов.

Существует ряд известных методов неразрушающего контроля металлических изделий: радиационные, тепловые, ультразвуковые, магнитные, вихретоковые [2, 3]. Однако радиационные методы требуют биологической защиты, ультразвуковые - механического контакта, вихретоковые чувствительны к изменению толщины и равномерности токопроводящего покрытия. На крупногабаритных изделиях, таких как бак летательного аппарата, колебания толщины токопроводящей пленки составляют 0,05-0,1 мм, что приводит к большим погрешностям. В работах [4-7] описываются методы, основанные на бесконтактном сканировании контролируемых объектов емкостным датчиком, образованным подвижным электродом и контролируемой поверхностью. Однако в указанных работах отсутствует математическое описание электромагнитных процессов, определяющих формирование информационных сигналов для различных видов повреждений токопроводящего покрытия, нанесенного на диэлектрический материал.

Целью работы являлась разработка устройства дистанционного контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов, позволяющего оперативно находить и маркировать поврежденные участки.

Основная часть

Исходя из требований искробезопасности, разрабатываемое устройство должно обеспечивать следующие метрологические и функциональные характеристики: минимальная площадь выявляемого дефекта $S \ge 0,01 \text{ м}^2$, минимальная площадь участка без ТПП $S_{\min} \ge 0,01 \text{ м}^2$, погрешность регистрации координаты внешних границ дефекта $\pm 2 \text{ мм}$, скорость контроля не менее 10 м^2 /час, толщина ТПП 0,01-0,1 мм, толщина теплоизоляции 20–40 мм.

В работах [8–9] предложено устройство дефектоскопии ТПП топливных баков летательных аппаратов, принцип действия которого основан на расчете и анализе электрического поля в многослойной структуре датчика, по изменению которого можно судить о наличии либо отсутствии дефекта. В случае линейности и изотропности среды электрическое поле в датчике описывается уравнением, полученным в результате комплексного использования системы уравнений Максвелла [4]:

$$J = \dot{\sigma} E, \quad E = -\text{grad}U, \quad \text{div}J = \frac{\partial \rho_{cv}}{\partial t}, \quad \dot{\sigma} = \sigma + j\omega\varepsilon, \quad (1)$$

где J – вектор плотности тока в среде; U – скалярный потенциал поля; ρ_{cv} – концентрация свободных зарядов в среде; σ – проводимость каждой точки среды; ε – диэлектрическая проницаемость каждой точки среды; E – напряженность электрического поля; ω – частота питания.

Тогда в дальнейшем из рассмотрения можно опустить время, а систему уравнений (2) заменить одним уравнением, которое получается в результате взаимных подстановок:

$$\operatorname{div}(\dot{\sigma}\operatorname{grad} U) = \operatorname{div}[(\sigma + j\omega\varepsilon)\operatorname{grad} U] = \frac{(G + j\omega C)U_m}{V}, \quad (2)$$

где σ , ε , U – проводимость, диэлектрическая проницаемость и напряжение в каждой точке структуры датчика и вокруг него; G, C – суммарные проводимость и емкость датчика, определяемые с учетом полей рассеивания; V – объем электродов.

Общее решение складывается из действительной и мнимой составляющих решения уравнения (2) и определяет амплитуду и фазу напряжения в каждой точке структуры датчика. Тогда комплексный суммарный ток датчика зависит от площади дефекта и конструкционных параметров согласно обобщенной функции:

$$I = F(S_d, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m) =$$

= $A(S_d, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m) e^{\phi(S_d, d_k, \sigma_k, \varepsilon_k, \omega, U_m)},$ (3)

где S_d – площадь дефекта; d_k – толщина каждого слоя; σ_k , ε_k – проводимость и диэлектрическая проницаемость каждого слоя; ω , U_m – частота и напряжение питания датчика.

Выражения (2) и (3) представляют собой математическую основу метода контроля ТПП. В двумерном представлении задача сводится к расчету плоского поля. Для учета краевых эффектов решение проводилось численным методом в условно расширенной области, состоящей из датчика и ограниченного пространства вокруг него, влияние размера которого оценивалось численным экспериментом. Рассматриваемое пространство описывалось идентификационным массивом, определяющим проводимость $\sigma(x, z)$ и диэлектрическую проницаемость $\varepsilon(x, z)$ в каждой точке поля. Решение проводилось методом конечных разностей (процесс Либмана) с нулевыми условиями на границах расширенной области. В результате определялась суммарная проводимость G и емкость C датчика при различных видах дефектов. Расчеты показали, что дефекты мало влияют на проводимость, зато емкость датчика существенно зависит от их размеров. В частности путем конечно-разностного расчета электрического поля определен закон изменения емкости при смещении электрода над замкнутым дефектом (рисунок 1). Моделирование проводилось в программной среде Mathcad.

Методика позволяет проводить расчеты при различных конструктивных параметрах и размерах дефектов. На основе численных расчетов и аналитических исследований дана оценка влияния паразитных емкостей на информационный сигнал датчика. Общую емкость между измерительным электродом и токопроводящим слоем можно рассматривать как параллельное соединение основной C_0 и паразитной C_p емкостей: $C = C_0 + C_p$. Паразитная емкость краевого эффекта для прямоугольного проводника определяется выражением (4):

$$C_{p} = \frac{1.113l}{8\pi} \cdot (4)$$

$$\cdot \left[\ln(\frac{8\pi l}{h}) - 3 + (1 + \frac{h_{R}}{h}) \ln(1 + \frac{h_{R}}{h}) - \frac{h_{R}}{h} \ln(\frac{h_{R}}{h}) \right] 10^{-12},$$

где l, h_R – ширина и толщина измерительного электрода; $h = \sum d_k$ – расстояние от электрода до контролируемой поверхности.

Основная емкость при отсутствии дефекта на ТПП определяется выражением (5):

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{l^2}{\frac{d_B}{\varepsilon_B} + \frac{d_L}{\varepsilon_L}},\tag{5}$$

где $d_B, d_L, \varepsilon_B, \varepsilon_L$ – толщина и диэлектрические проницаемости воздуха и лакокрасочного покрытия. Относительное значение паразитной емкости C_p можно определить как:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_0} = \frac{0,005[\ln(\frac{8\pi l}{d_B + d_L}) - 3]}{l} (\frac{d_B}{\epsilon} + \frac{d_L}{\epsilon_L}).$$
(6)



Рисунок 1 – Расположение дефекта (a) и изменение емкости датчика при перемещении над ним электрода (b) для l = 100 мм, D = 140 мм; l – ширина электрода; D – размер дефекта; x – расстояние между началом электрода и точкой отсчета; d – расстояние между электродом и токопроводящим покрытием

Figure 1 – The location of the defect (*a*) and the change in the capacitance of the sensor when the electrode moves over it (*b*) for l = 100 mm, D = 140 mm; l – the width of the electrode; D – the size of the defect; x – the distance between the beginning of the electrode and the reference point; d – the distance between the electrode and the conductive coating Формула (6) позволяет выбрать такие значения ширины электрода l и толщины воздушного зазора d_l , при которых краевыми эффектами можно пренебречь с заданной погрешностью. Определены условия, при которых функцию преобразования, показанную на рисунке lb, можно приближенно описать аналитически отрезками прямых. В этом случае математическая модель, аппроксимирующая график на рисунке lb с погрешностью $\gamma < 1$ %, имеет вид (7):

$$C(x) = C_{1} + C_{2} + C_{3},$$
(7)
где при $x \le x_{0}: C_{1} = \varepsilon_{0} \frac{l^{2}}{A}, C_{2} = 0, C_{3} = 0,$

$$A = \frac{d_{B}}{\varepsilon_{B}} + \frac{d_{L}}{\varepsilon_{L}}, \quad B = \frac{d_{P}}{\varepsilon_{P}} + \frac{d_{T}}{\varepsilon_{T}};$$
при $x_{0} \le x \le (x_{0} + l): \quad C_{1} = \varepsilon_{0} \frac{l(l - x + x_{0})}{A},$

$$C_{2} = \varepsilon_{0} \frac{l(x - x_{0})}{A + B}, C_{3} = 0;$$
при $(x_{0} + l) \le x \le (x_{0} + D): C_{1} = 0, C_{2} = \varepsilon_{0} \frac{l^{2}}{A + B}, C_{3} = 0;$
при $(x_{0} + D) \le x \le (x_{0} + l + D): C_{1} = 0,$

$$C_{2} = \varepsilon_{0} \frac{l(l - x - x_{0} + D)}{A + B}, C_{3} = \varepsilon_{0} \frac{l(x - x_{0} - D)}{A};$$
при $x \ge (x_{0} + l + D): C_{1} = 0, C_{2} = 0, \quad C_{3} = \varepsilon_{0} \frac{l^{2}}{A},$

где $d_p, d_7, \varepsilon_p, \varepsilon_7$ – толщина и проводимость ТПП и теплоизоляции соответственно; x_0 – точка начала дефекта.

Сущность технического решения поясняется рисунком 2, где приведена обобщенная структурная схема.

На подвижной платформе 2, расположенной вблизи контролируемой поверхности бака 1, размещается датчик зазора 3, электрод емкостного датчика дефекта 4 и устройство маркировки 5, представляющее собой картридж, выбрасывающий краску по сигналу устройства 7, управляемого сигналом контроллера 6, на входы которого поступают сигналы с датчиков 3, 4, а так же с датчиков положения платформы 9 и угла поворота бака 11, которые получают сигналы с электроприводов перемещения платформы 8 и поворота бака 10. Блок передает информацию на персональный компьютер 12. Датчик температуры 13 передает сигнал в блок управления, который корректирует сигналы емкостного датчика и датчика зазора. Бак дискретно вращается вокруг своей оси. Данные о состоянии ТПП записываются в виде таблицы либо диаграммы.



Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема устройства контроля целостности токопроводящего покрытия: 1 – контролируемая поверхность бака; 2 – подвижная платформа; 3 – датчик зазора; 4 – электрод емкостного датчика дефекта; 5 – устройство маркировки; 6 – контроллер; 7 – управляющее устройство; 8 – электропривод перемещения платформы; 9 – датчик положения платформы; 10 – электропривод поворота бака; 11 – датчик угла поворота бака; 12 – персональный компьютер; 13 – датчик температуры

Figure 2 – A block diagram of the device monitoring the integrity of the conductive coating: 1 – controlled surface of the tank; 2 – mobile platform; 3 – gap sensor; 4 – electrode capacitive defect sensor; 5 – marking device; 6 – the controller; 7 – control device; 8 – electric movement of the platform; 9 – platform position sensor; 10 – electric rotation of the tank; 11 – tank gate angle sensor; 12 – personal computer; 13 – temperature sensor

Принцип работы устройства основан на измерении емкости и диэлектрических потерь между сканирующим электродом и контролируемой поверхностью. При конструировании устройств контроля ТПП следует использовать методы, основанные на переменном токе [10]. Для задач контроля ТПП наиболее пригодны параметрические методы, так как они имеют высокое быстродействие и не требуют специальных действий со стороны оператора измерительной установки.

На рисунке 3 показана структурная схема мостового параметрического устройства измерения емкости.

Генератор 1 питает переменным напряжением RC-мост, одним плечом которого является емкостной датчик 4, другим – параллельно включенные емкость C_{ST} и резистор R_{ST} , значения которых соответствуют емкости и проводимости датчика дефекта при выбранном зазоре и при отсутствии дефекта. Выходной сигнал, снимаемый с диагонали моста и зависящий от текущей емкости датчика, через усилитель подается на вход сигнального процессора (контроллера дефекта), который содержит внутри себя аналого-цифровой преобразователь и вычисляет емкость с поправками на температуру и величину воздушного зазора, поступающими в него с датчиков 5 и 6 соответственно. При равновесии моста выходной сигнал равен нулю, в противном случае возникает напряжение, амплитуда которого равна $\Delta C = C_{ST} - C_X$. Если данное отклонение больше некоторого заданного значения ΔC_0 , определяемого при калибровке, то сигнальный процессор выдает импульс в базовый контроллер, который подает сигнал на устройство управления картриджем, отмечающем положение дефекта.



Рисунок 3 – Структурная схема устройства контроля в системе дефектоскопии токопроводящих покрытий: 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – сигнальный процессор; 4 – емкостной датчик дефекта; 5 – датчик температуры; 6 – датчик зазора

Figure 3 – Block diagram of the control device in the flaw detection system of conductive coatings: 1 - generator; 2 - power; 3 - signal processor; 4 - capacitive defect sensor; 5 - temperature sensor; 6 - gap sensor

Для привязки показаний датчика к конкретному виду ТПП и другим конструкционным параметрам (в частности, зазора и площади электрода) производится калибровка устройства. Выбор режима калибровки осуществляется вручную один раз перед запуском на контроль каждого изделия. Скорость сканирования выбрана таким образом, чтобы методическая погрешность идентификации дефекта не выходила за допустимые значения. В каждом такте измерительной процедуры в процессор вводится информация о текущем значении сигнала емкостного датчика дефекта U_x , величины зазора d(x) и текущей температуры θ . Приведенный сигнал датчика можно записать как:

$$U_{p} = U_{x} + (\theta - \theta_{0}) k_{\theta} + (d - d_{0}) k_{d}, \qquad (8)$$

где U_p , U_x – приведенное и реальное значения сигнала емкостного датчика; θ_0 , θ – сигналы, соответствующие нормальной и текущей температурам окружающей среды (обычно $\theta_0 = 20$); k_{θ} – температурный коэффициент, зависящий от конструктивных и технологических особенностей датчика; d_0 , d – сигналы, соответствующие эталонному и текущему зазорам в емкостном датчике; k_d – коэффициент, зависящий от конструктивных и технологических особенностей датчика.

Формула (8) справедлива при изменении зазора и температуры в пределах ± 10 % от базового значения.

Далее происходит вычитание кодов, соответствующих эталонному (бездефектному) и реальному значениям сигналов датчика дефекта $\Delta = U_0 - U_p$, и если разность превышает допустимое значение Δ_0 , то процессор выдает сигнал на включение картриджа, осуществляющего отметку дефекта. Выбором уровня Δ_0 можно настраивать систему на игнорирование малых дефектов, которые по техническим условиям не должны быть идентифицированы разрабатываемым устройством. Рассмотренная схема мало чувствительна к изменениям температуры и амплитуды напряжения питания.

Экспериментальные исследования

В рамках исследования проведен эксперимент, для которого были изготовлены макетные образцы емкостного датчика и устройства сканирования, которые базировались на лабораторном испытательном стенде.

В качестве макета токопроводящей пленки выбран стеклотекстолит марки *FR*4. Размер листа $350 \times 450 \times 1,5$ мм, толщина 18 мкм. Поверхность бака имитируется алюминиевым листом 600×800 мм, толщиной 1,5 мм, теплоизоляция – листом пенопласта толщиной 40 мм. Сканирующий электрод имеет размер 40×40 мм и зазор между контролируемой поверхностью 1,5 мм. Исследования проводились с помощью прибора *E*7-14, диапазон измерения емкости 10^{-15} –1 Ф, погрешность < 0,1 %. Измерения проводились на частоте 1 кГц.

Для уменьшения возникающей из-за подключающих проводов погрешности измерения сканирующий электрод и ТПП подключены по схеме, приведенной на рисунке 4 [11]. Для подключения электрода и ТПП выбраны экранированные провода с одинаковой длиной. Лист, имитирующий бак, электрически соединен с ТПП перемычкой. Перед началом эксперимента мостовой измеритель иммитанса *E*7-14 калибруется в режиме минимального сопротивления путем короткого замыкания электрода и ТПП, затем проводится калибровка нуля – при этом измерительный электрод отводится от ТПП на значительное расстояние.



Рисунок 4 – Схема измерительного стенда



В ходе эксперимента сначала исследовались краевые эффекты на неповрежденном участке ТПП, экспериментально определялись электрические параметры модели. При исследовании поврежденной поверхности, которая имела изолированный дефект размером 150 × 250 мм, датчик смещался над трещиной. На рисунке 5 приведен график, где сопоставляются экспериментальные и теоретические зависимости емкости от перемещения датчика над трещиной.



Рисунок 5 – Зависимость емкости от перемещения емкостного датчика над трещиной

Figure 5 – Dependence of capacity on displacement of a capacitive sensor above a crack

Проведены исследования, связанные с перемещением датчика над дефектами различных размеров. Дополнительно были проведены эксперименты с целью исследования емкости при изменении зазора между сканирующим электродом и поверхностью ТПП. Полученные результаты практических исследований подтвердили данные теоретических расчетов и корректность математической модели с точностью не хуже 5 %. Созданный макетный образец устройства контроля целостности ТПП подтвердил возможность фиксации дефектов с погрешностью ± 2 мм при скорости сканирования меньше 0,02 м/с.

Сформулированы требования к точности выявления и обозначения местоположения дефекта, а также к комплектующим элементам устройства по погрешности и быстродействию. Дефект определяется по уменьшению емкости на величину заданного отклонения ΔC , по которой можно идентифицировать дефект, превышающий по размеру допустимую величину: $C_{\text{max}} - C(x) < \Delta C$ – дефекта нет, $C_{\text{max}} - C(x) \geq \Delta C$ – дефект есть.

При заданном ΔC погрешность фиксации координаты дефекта определится по формуле:

$$\Delta x = \frac{A(A+B)}{\varepsilon_0 l(2A+B)} \Delta C. \tag{9}$$

Если размер электрода выбрать больше минимально допустимого дефекта D_0 , то подбирая порог идентификации дефекта $\Delta C \approx C'$, можно автоматически игнорировать мелкие дефекты, размер которых $D < D_0$. При $l = K_R \cdot D_0$, где $K_R > 1,0$ – коэффициент размера электрода, порог идентификации определится по формуле:

$$\Delta C = C'_{\min} = \varepsilon_0 l D_0 \left(\frac{K_R - 1}{A} + \frac{1}{A + B} \right). \tag{10}$$

При этом будет иметь место систематическая аддитивная погрешность координаты дефекта:

$$\Delta_0 = D_0 \frac{K_R (A+B) - B}{2A+B}.$$
 (11)

Систематическая погрешность компенсируется конструкционными методами. Корректирование температурной погрешности осуществляется путем введения сигнала датчика температуры и использования его в алгоритмах вычислений. Динамические погрешности определяются инерционностью процессов изменения емкости и схем обработки сигналов при перемещении электрода со скоростью v, определяющей общее время контроля изделия. При выбранном пороге ΔC , V и T возникнет ситуация, когда электрод «проскочит» дефект, при этом емкость не успеет измениться на величину, большую порогового значения ΔC . Формула (12) связывает скорость сканирования, допустимую динамическую погрешность Δx_d и конструкционные параметры датчика при $x_0 < x < (x_0 + l)$:

$$v = \frac{\Delta C(A+B) - l\varepsilon_0 \Delta x_d}{l\varepsilon_0 T \cdot \ln[1 - \frac{\Delta C(A+B)}{\Delta C(A+B) - l\varepsilon_0 \Delta x_d}]}.$$
(12)

Зная заданную погрешность Δx_d и конструкционные параметры можно найти предельную скорость сканирования. Сводные значения погрешностей приведены в таблице.

Таблица/Table

Сводная таблица погрешностей
Summary table of errors

Причина погрешности Cause of error	Обозна- чение Desig- nation	Значе- ния, мм Values, mm	Примечание Note
Порог обна- ружения Detection threshold	Δ_{c}	1,0-4,0	при <i>l</i> =0,1 м
Датчик воздушного зазора Air gap sensor	$\Delta_{_B}$	0,2–0,8	
Температура Temperature	Δ_{θ}	0,0–0,7	$-10 < \theta < 50 $ °C
Скорость сканирова- ния Scan speed	Δ_d	1,0–5,0	0,05 < V < 0,20 m/c

Суммарная погрешность всей системы определяется по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{C}^{2} + \Delta_{B}^{2} + \Delta_{\theta}^{2} + \Delta_{d}^{2}} = 1.48 \div 6.5 \text{ MM}, \quad (13)$$

Полученные значения являются завышенными, так как определены для самых неблагоприятных случаев, когда все виды погрешностей имеют максимальные составляющие компоненты.

Заключение

Разработано устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетнокосмической техники, которое за счет специфики методов емкостного контроля, обладающих максимальной чувствительностью к дефектам тонких токопроводящих покрытий, отличается возможностью оперативной настройки на исключение дефектов, надежностью, простотой технической реализации. Представлены результаты конечно-разностного расчета электрического поля в структуре емкостного датчика при наличии дефекта. Выведены аналитические выражения, определяющие функцию преобразования датчика дефектов токопроводящих покрытий, которые подтвердили корректность конечно-разностных расчетов.

В результате экспериментальных исследований макетного образца устройства выявлено, что абсолютная погрешность фиксации дефекта составляет ± 2 мм при скорости сканирования 0,02 м/с, порог чувствительности зависит от размера сканирующего электрода и определяется конкретным техническим заданием. В целом метрологический анализ показал возможность создания устройства, позволяющего фиксировать границы дефекта с погрешностью, не превышающей $\Delta_{\Sigma} = \pm 3$ мм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России. В статью включены результаты, полученные в рамках реализации государственного задания (номер проекта 8.2297.2017/4.6).

Список использованных источников

1. *Овчаренко, А.Г.* Электростатическая безопасность пожаро- и взрывоопасных производств / А.Г Овчаренко. – Бийск : БТИ АлтГТУ, 2006. – 156 с.

2. *Вавилов, В.Д.* Микросистемные датчики физических величин / В.Д. Вавилов, С.П. Тимошенков, А.С. Тимошенков. – М. : Техносфера, 2018. – 500 с.

3. Шатерников, В.Е. Вихретоковый метод неразрушающего контроля тонколистовых металлических изделий / В.Е. Шатерников, С.В. Клюев. – М. : Машиностроение, 2007. – 173 с.

4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Том II. Теория поля / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : ФИЗ-МАТЛИТ, 2006. – 304 с.

5. *Hegg, M.C.* Remote monitoring of resin transfer molding processes by distributed dielectric sensors / M.C. Hegg [et al.] // Journal of Composite Materials. – 2005. – No. 39. – P. 1519–1539.

DOI: 10.1177/0021998305051083

6. *Hegg, M.C.* Influence of variable plate separation on fringing electric fields in parallel-plate capacitors / M.C. Hegg, A.V. Mamishev // Electrical Insulation, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on. – 1998. – P. 384–387. **DOI:** 10.1109/ELINSL.2004.1380606 7. *Батищев, В.И.* Измерение параметров емкостных датчиков положения и перемещения / В.И. Батищев, В.С. Мелентьев. – М. : Машиностроение. – 2005. – 124 с.

8. *Самсонов, А.С.* Контроль целостности токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов / А.С. Самсонов, Б.В. Скворцов // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 9. – С. 34–40.

9. *Скворцов, Б.В.* Проблемы дефектоскопического контроля токопроводящего покрытия топливных баков летательных аппаратов / Б.В. Скворцов [и др.] // Известия СНЦ РАН. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 114–118.

10. *Афонский, А.А.* Электронные измерения в нанотехнологиях и в микроэлектронике / А.А. Афонский, В.П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс. – 2012. – 688 с.

11. Цветков, Э.И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э.И. Цветков. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – 293 с.

Acknowledgments

This paper is financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant No. 8.2297.2017/4.6).

References

1. Ovcharenko A.G. *EHlektrostaticheskaya bezopasnost' pozharo- i vzryvoopasnykh proizvodstv* [Electrostatic safety of fire and explosive industries]. Biysk, BTI AltGTU, 2006, 156 p.

2. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin* [Microsystem sensors of physical quantities]. Moscow, Technosphere Publ., 2018, 500 p.

3. Shaternikov V.E., Klyuev S.V. Vikhretokovyj metod nerazrushayushhego kontrolya tonkolistovykh metallicheskikh izdelij [Eddy current method of non-destructive testing of thin sheet metal products]. Moscow, Engineering Publ., 2007, 173 p.

4. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Tom II. Teoriya polya* [Theoretical physics. Volume II. Field theory]. Moscow, Physmatlit Publ., 2006, 304 p.

5. Hegg M.C., Ogale A., Mescher A., Mamishev A.V., Minaie B. Remote monitoring of resin transfer molding processes by distributed dielectric sensors. *Journal of Composite Materials*, 2005, no. 39, pp. 1519–1539. **DOI:** 10.1177/0021998305051083

6. Hegg M.C., Mamishev A.V. Influence of variable plate separation on fringing electric fields in parallel-plate capacitors. *Electrical Insulation, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on*, 1998, pp. 384–387.

DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380606

7. Batishchev V.I., Melentyev V.S. *Izmerenie parametrov emkostnykh datchikov polozheniya i peremeshheniya* [Measurement of parameters of capacitive position and displacement sensors]. Moscow, Engineering Publ., 2005, 124 p.

8. Samsonov A.S., Skvortsov B.V. [Monitoring the integrity of the conductive coating of aircraft fuel tanks]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrumentation], 2015, no. 9, pp. 34–40 (in Russian).

9. Skvortsov B.V., Samsonov A.S., Blinov D.I., Ilmurzina S.F. [Problems of flaw detection of conductive coating of aircraft fuel tanks]. *Izvestiya SNTS RAN* [News SSC RAS], 2016, vol. 18, no. 1, pp. 114–118 (in Russian).

10. Afonskiy A.A., D'yakonov V.P. *EHlektronnye izmereniya v nanotekhnologiyakh i v mikroehlektronike* [Electronic measurements in nanotechnology and microelectronics]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 688 p.

11. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskij analiz. Metrologicheskij sintez* [Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis]. Publishing house SPbGETU «LETI», 2014, 293 p.

Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр

А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В. Чумаков, А.В. Домарацкий

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

Поступила 26.11.2018 Принята к печати 05.02.2019

В последнее время в мировой практике аэрокосмического мониторинга Земли наблюдается все более активное внедрение методов и средств гиперспектральной съемки. Таким образом, создание систем, предназначенных для регистрации гиперспектральных данных и методов их обработки, является актуальной задачей дистанционного зондирования Земли. Целью работы являлась разработка и создание маломассогабаритного спутникового модульного гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона, предназначенного для получения информации дистанционного зондирования Земли с целью постоянного обновления данных о состоянии природной среды и объектов инфраструктуры видеоспектральными методами с возможностью комплексного изучения как спектральных, так и пространственных характеристик наблюдаемых объектов.

Представлен маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр. К отличительным особенностям аппаратуры относятся высокое спектральное разрешение и малые габариты. Гиперспектрометр включает в себя два основных модуля: оптический модуль и модуль электроники. Особенностью конструкции оптического модуля является использование в полихроматоре вогнутой голографической дифракционной решетки. Модуль электроники построен на основе одноплатного компьютера. Представлено их описание и конструктивные особенности. Приведена схема формирования гиперкуба и программное обеспечение для его дальнейшей обработки. Представлено разработанное техническое обеспечение (контрольно-поверочная аппаратура, имитатор космического эксперимента и система пространственного сканирования) для проверки работоспособности, а также проведены тестовые съемки.

Стоит отметить чрезвычайно малые габариты для такого класса устройств по сравнению с аналогами, а также виброустойчивость аппаратуры.

Ключевые слова: гиперспектрометр, дистанционное зондирование, гиперкуб, спектр.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.О. Мартинов	A.O. Martinov
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко	A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Белорусского государственного университета	Belarusian State University,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь	Kurchatova str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: antonmartenov@gmail.com	e-mail: antonmartenov@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В Чумаков,	A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov,
А.В. Домарацкий.	A.V. Damaratski.
Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр.	[The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 32–41.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 32-41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer

A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov, A.V. Damaratski

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

Received 26.11.2018 Accepted for publication 05.02.2019

Abstract

Recently in the world practice of aerospace monitoring of the Earth there has been an increasingly active using of methods and devices of hyperspectral imaging. Thus creation of systems designed for recording hyperspectral data and methods for their processing is an actual task for remote sensing of the Earth. The aim of the article was to develop and create a small-sized satellite modular hyperspectrometer in visible and near infrared range, designed to receive information on remote sensing of the Earth in order to constantly update data about state of natural environment and infrastructure objects using video-spectral methods with the possibility of comprehensive study of both spectral and spatial characteristics of the observed objects.

A small-scale satellite modular hyperspectrometer has been developed. The distinctive features of the equipment include high spectral resolution and small dimensions. A hyperspectrometer includes two main modules: an optical module and an electronics one. The design feature of the optical module is the use of a concave holographic diffraction grating in a polychromator. The electronics module is based on a single board computer. Their description and design features, a scheme for the formation of a hypercube and software for its further processing are presented in the paper. The developed hardware (test equipment, a space experiment simulator and a spatial scanning system) for efficiency testing is presented also, as well as test measurements ware conducted.

It is worth noting the extremely small dimensions for this class of devices in comparison with analogues as well as the vibration resistance of the equipment.

Keywords: hyperspectrometer, remote sensing, hypercube, spectrum.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.О. Мартинов	A.O. Martinov
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко	A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Белорусского государственного университета	Belarusian State University,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь	Kurchatova str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: antonmartenov@gmail.com	e-mail: antonmartenov@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.О. Мартинов, Ю.В. Беляев, Б.И. Беляев, А.В Чумаков,	A.O. Martinov, Yu.V. Beliaev, B.I. Beliaev, A.V. Chumakov,
А.В. Домарацкий.	A.V. Damaratski.
Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр.	[The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 32–41.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 32–41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-32-41

Введение

В связи с активизацией разработки средств и программ дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с авиакосмических носителей и повышения их информативности созданию гиперспектральных систем уделяется повышенное внимание во всех развитых странах. Наличие большого количества узких спектральных полос в гиперспектральных изображениях позволяет не только применять эффективные методы классификации [1-3], но и открывает новые возможности, недоступные для мультиспектральных данных. Так, в работах [4, 5] описываются преимущества гиперспектральных данных над мультиспектральными в дистанционном зондировании почв и растительности. В работах [6, 7] описываются методы оценки состояния ледового покрова и методы мониторинга экологического состояния рек и водоемов.

Перед разработкой модульного гиперспектрометра (МГС) были проведены патентные исследования с целью сопоставительного анализа показателей технического уровня объекта разработки с отечественными и зарубежными объектами аналогичного назначения. В патентном анализе рассматривались гиперспектральные системы США, Канады, РБ, РФ [8] и других стран. По результатам исследования модельного ряда таких систем, как AVIRIS, CASI, AISA, APEX, *HySpex* выяснено, что даже AISA EAGLE [9], который является чрезвычайно компактным самолетным гиперспектрометром, имеет массу 20,5 кг (6,5 кг оптический модуль и 14 кг - компьютер для обработки данных). Большинство остальных систем имеет массу 50 кг и выше.

Достигнутый в настоящее время уровень высокотехнологичных компонентов для создания быстродействующих электронно-оптических детекторов позволяет создавать малогабаритную бортовую аппаратуру ДЗЗ, которая с малых космических аппаратов и авиационных средств способна решать задачи по спектральному и пространственному позиционированию характеристик разнообразных оптических событий.

Целью данной работы являлось создание гиперспектральной системы малых габаритов, которая построена на модульном принципе. Использование данных МГС позволит получать высокоинформативный поток данных ДЗЗ, решая при этом задачи классификации, распознавания, диагностики и количественной оценки параметров состояния различных объектов природно-техногенной сферы.

Конструкция модульного гиперспектрометра

МГС предназначен для регистрации в автономном режиме с борта летательных аппаратов оптических характеристик подстилающей поверхности Земли при мониторинге состояния и пространственной структуры природно-антропогенных наземных комплексов. МГС включает в себя:

- модуль оптический;
- модуль электроники;
- систему пространственного сканирования.

Модуль оптический (МО) – полихроматор с вогнутой дифракционной решеткой (ДР), входным объективом и матричным приемником излучения на область 0,40–0,95 мкм предназначен для регистрации спектральных изображений в плоскости приемника. Конструктивно МО представляет собой жесткую конструкцию с общим основанием и внешним корпусом, в котором размещен полихроматор с матричным приемником излучения. Входной объектив фокусирует излучение внешней среды на входную щель полихроматора, на месте выходной щели полихроматора расположен матричный приемник оптического излучения (рисунок 1).

Обратная линейная дисперсия полихроматора с вогнутой ДР определяет энергетику спектрометра и спектральное разрешение. Этот параметр можно вычислить по приближенной формуле (10):

$$D^{-1} \equiv \frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{mnr_b} \cdot \cos\frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2} =$$

$$= \frac{10^6 \text{ HM}}{315 \cdot 99,5 \text{ MM}} \cos\left(\frac{0,073046 + 0,148059}{2}\right) = 31,7\frac{\text{HM}}{\text{MM}},$$
(1)

где n – плотность штрихов решетки; m – порядок дифракции; r_b – расстояние от решетки до приемника; β_1 , β_2 – углы дифракции для длин волн начала и конца рабочего спектрального диапазона [10].

Спектральное разрешение может быть оценено по следующей формуле:

$$\Delta \lambda = \frac{b_s \cos \alpha}{mnr_a} = \frac{0.1 \text{ MM} \cdot \cos(0.184272)}{1 \cdot 315 \text{ MM}^{-1} \cdot 100 \text{ MM}} = 3.1 \text{ HM}, \quad (2)$$

где b_s – ширина входной щели полихроматора; α – угол между нормалью ДР и центром входной щели; r_a – расстояние от решетки до щели. На аттестованном метрологическом комплексе «Камея» были проведены спектральные измерения с целью определения спектральной разрешающей способности устройства. На МГС посылалось монохроматическое излучение с узкой спектральной шириной (около 0,5 нм) и определялась аппаратная функция полихроматора. По итогам измерений спектральное разрешение МГС составило 4,5 нм.



Рисунок 1 – Оптическая схема матричного полихроматора: a – меридиональное сечение; b – сагиттальное сечение Figure 1 – Optical scheme of a matrix polychromator: a – meridional section; b – sagittal section

Особенностью конструкции МО является использование в полихроматоре вогнутой голографической ДР «Flat Field and Imaging Gratings Туре IV». Эта решетка антиастигматическая и создавалась для применения в гиперспектрометрах. Решетки такого типа изготавливаются со штрихами, которые не являются ни равномерно расположенными, ни параллельными, и оптимизированы с помощью компьютера для формирования почти идеальных изображений входной щели на плоскости детектора [11]. В этой ДР для крайних и средней длин волн обеспечивается нулевое, для остальных - минимальное значение астигматизма, что позволяет увеличить пространственное разрешение разрабатываемого на основе такой решетки гиперспектрометра. Использование вогнутой голографической ДР снижает габариты оптического модуля практически в два раза по сравнению с полихроматором, в котором используется плоская ДР, поскольку отпадает необходимость в использовании камерного и коллимационного объектива. Вогнутая ДР выполняет функции обоих объективов (что важно

для маломассогабаритных приборов). Используемая решетка закреплена в специальном держателе, который с помощью винтов облегчает процесс юстировки прибора. Конструктивно элементы МО (ДР, входная щель, приемник излучения) крепятся на жесткую раму, что повышает ударо- и виброустойчивость разрабатываемого оборудования. В качестве приемника излучения, регистрирующего спектры подстилающей поверхности, используется *СМОS* камера *МХGС*40 с приемной матрицей *СМОSIS СМV*4000. Благодаря выбранной конструкции (минимальному количеству оптических элементов) МГС обладает повышенной виброустойчивостью. Технические характеристики МО представлены в таблице.

Модуль электроники (МЭ) на основе одноплатного компьютера служит для управления режимами работы оптического модуля, сжатия и передачи данных в бортовой компьютер микроспутника. МЭ состоит из компьютера «*Tibis*», контроллера полихроматора, блока питания и располагается в отдельном корпусе. Внешний вид МО и МЭ представлены на рисунке 2.
Компьютер имеет следующие характеристики: процессор *Intel Core i5-6260U*, 16 ГБ оперативной

памяти *DDR*4, *SSD* диск, встроенная графика *Iris* 540. Габариты МЭ 115 \times 111 \times 32 мм, масса – 730 г.

Таблица / Table

Основные технические характеристики модульного гиперспектрометра

The main technical characteristics of the small-scale satellite modular hyperspectrometer

Наименование Name	Значение Value	Элемент конструкции Construction element
Рабочий спектральный диапазон, мкм Operating spectral range, microns:	0,4–0,95	
Спектральное разрешение, нм Spectral resolution, nm	4,5	Полихроматор Polychromator
Рассчетное пространственное разрешение с высоты 100 км, м Estimated spatial resolution from a height of 100 km, m	20	
Диаметр апертуры входного объектива, мм The diameter of the aperture of the input lens, mm	48	Входной объектив «Теле-
Фокусное расстояние входного объектива, мм Focal length of the input lens, mm	315	Input lens <i>«Telezenitar»</i>
Полихроматор модуля оптического Polychromator of the optical module		
Дисперсия дифракционной решетки, нм/мм Dispersion of a diffraction grating, nm/mm	37,8	
Диаметр дифракционной решетки, мм Diameter of the diffraction grating, mm	70	Π
Относительное отверстие Relative hole	1/2,8	Diffraction grating
Диаметр круга Роуланда, мм Diameter of the Rowland circle, mm	190	
Плотность штрихов дифракционной решетки, штр/мм The density of the lines of the Diffraction grating, lines/mm	133	
Приемная матрица Reception matrix		
Размеры активной области приемной матрицы, мм Dimensions of the active region of the receiving matrix, mm	11,05 × 11,25	
Количество эффективных пикселей приемной матрицы, шт The number of effective pixels of the receiving matrix, pcs	2040×2044	Матрица
Размер пикселя приемной матрицы, мкм Pixel size of the receiving matrix, µm	5,5 × 5,5	Matrix CMOSIS CMV4000
Скорость регистрации данных, кадров в секунду Data acquisition rate, fps	29	
Тип архитектуры Architecture type	Global Shutter CMOS	
Тип интерфейса Interface type	Gigabit Ethernet	Плата (обрамление) матрицы Matrix board CMOSIS CMV4000
Габариты модуля оптического, мм Optical module dimensions, mm	360 × 130 × 150	
Macca модуля оптического, г Optical module mass, g	2970	



Рисунок 2 – Внешний вид модульного гиперспектрометра: І – модуль оптический; ІІ – модуль электроники; ІІІ – система пространственного сканирования; 1 – камера системы видеопривязки; 2 – зеркало; 3 – кулачковый механизм

Figure 2 – Small-scale satellite modular hyperspectrometer: I – optical module; II – electronics module; III – spatial scanning system; 1 – camera of the video reference system; 2 – mirror; 3 – cam mechanism

Система пространственного сканирования (СПС) позволяет осуществлять медленное сканирование поля зрения МО в горизонтальной плоскости. СПС включает в себя системы видеопривязки и позиционирования. Система видеопривязки состоит из объектива, матричной камеры в едином корпусе и юстировочного устройства для совмещения полей зрения системы видеопривязки и МО. Юстировочное устройство позволяет перемещать оптическую ось системы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, добиваясь таким образом совмещения центров полей зрения системы видеопривязки и МО. Поле зрения системы видеопривязки в вертикальной плоскости больше поля зрения МО МГС. При сканировании МО в горизонтальной плоскости оператор имеет возможность наблюдать в реальном масштабе времени изображение объекта, регистрируемого МГС. Система позиционирования включает в себя плоское зеркало, двигатель с редуктором, кулачек со штангой и привод зеркала, которые закреплены на общем основании. Сканирование обеспечивается поворотом зеркала с регулировкой и подбором скорости сканирования.

Получение гиперспектральных данных и программное обеспечение модульного гиперспектрометра

МГС построен по типу *push broom* (в каждый момент времени регистрируется узкая полоса

зондируемой поверхности. Выделение узкой полоски производится посредством входной щели). Поэтому формирование гиперспектрального изображения подстилающей поверхности происходит при перемещении летательного аппарата. Входная щель полихроматора МО МГС сканирует по пространству исследуемый объект одновременно с регистрацией спектральных изображений. Каждое полученное изображение соответствует определенной пространственной области, которая имеет форму вытянутого прямоугольника из-за наличия входной щели. Из набора фотоснимков формируется гиперкуб, за создание которого отвечает разработанное программное обеспечение (ПО). Дальнейшая обработка спектральных данных, зарегистрированных приемником излучения МО, проводится с помощью разработанного программного комплекса тематической обработки гиперспектральных данных [12]. Его функционал включает в себя широкий набор инструментов для визуализации, представления данных и проведения манипуляций с ними, а также позволяет тематическую обработку:

атмосферная коррекция [13];

– классификация с обучением и без обучения;

 – синтез и отображение цветных и псевдоцветных изображений, включая формирование изображения с заданным спектральным профилем;

– устранение шумов в данных;

 – сравнение спектральных кривых между собой, установление степени их близости;

– поиск пикселей со схожими спектрами отражения с определенным доверительным интервалом (установление близости по определенной метрике спектральных кривых выбранного пикселя и остальных пикселей изображения. Результатом является построение бинарного изображения, у которого одним цветом отображаются пиксели, не удовлетворяющие установленному порогу степени близости, а другим цветом отображаются точки, спектрально схожие с исходной с заданной степенью близости).

 – поиск наиболее вероятного процентного состава смеси спектров [14].

Проверка работоспособности

С целью проверки работоспособности МГС и ПО было специально разработано техническое обеспечение, в состав которого вошли:

- контрольно-поверочная аппаратура (КПА);

- имитатор космического эксперимента (ИКЭ);

- система пространственного сканирования.

КПА изготовлена для осуществления функциональной диагностики работоспособности МГС на всех стадиях наземной отработки. Она позволяет моделировать монохроматическое излучение источников при проведении испытаний МГС с целью их отображения в поле приемной матрицы. Основными элементами КПА МГС (рисунок 3) являются смартфон, на экране которого отображается поверхность Земли, регистрируемая с борта космического носителя. Экран смартфона находится в фокальной плоскости выходного объектива с фокусным расстоянием и апертурой, аналогичными входному объективу МО МГС. Расположение экрана в фокальной плоскости обеспечивает передачу видеоизображения из бесконечности, т.е. воспроизводятся реальные условия съемки гиперспектрометром. Корпус КПА позволяет установить требуемое расстояние между экраном смартфона и выходным объективом. Бленда, в которой помещается выходной объектив, позволяет стыковаться с входным объективом МО и практически исключить ненужные боковые засветки.



Рисунок 3 – Контрольно-поверочная аппаратура: 1 – бленда с объективом; 2 – корпус; 3 – смартфон **Figure 3** – Test equipment: 1 – hood and lens inside; 2 – body; 3 – smartphone

Программное обеспечение смартфона позволяет записать и затем воспроизводить программу отображения земной поверхности, снятой с движущегося носителя. МО регистрирует гиперспектральные данные. Просмотр и оценка качества полученных данных позволяют судить о работоспособности МО МГС при различных режимах его функционирования.

ИКЭ обеспечивает имитацию движения подстилающей поверхности с разных высот и с различной скоростью для отработки параметров гиперспектральной съемки в реальных условиях космического эксперимента. Основными элементами ИКЭ МГС являются персональный компьютер, проектор, экран и ПО. С компьютера запускается программа, воспроизводящая видеоизображение поверхности Земли с движущегося носителя. Был разработан программный комплекс «Имитатор космического эксперимента». Проектор передает видеоизображение с ноутбука на экран. Изображение на экране регистрируется МГС в реальном масштабе времени. Скорость «прокрутки» изображения регулируется. Подстилающая поверхность Земли, демонстрируемая на экране, снята с различным пространственным разрешением, что дает возможность подбирать оптимальные параметры входного объектива МО МГС в зависимости от требуемого разрешения прибора. Использование нейтральных светофильтров различной плотности позволяет моделировать различные условия освещенности и оценивать параметры чувствительности и подбирать требуемые времена экспозиции МО МГС, минимизировать процент «смаза» видеоизображения.

Система пространственного сканирования позволяет получить гиперкуб со стационарной точки. В лабораторных условиях было проверено функционирование трех модулей МГС. На одной оптической оси устанавливался МО и поворотное зеркало СПС так, чтобы линия визирования системы направлялась через окно на окружающие объекты (здания и растительность, удаленные на 1000 м.). Сканирование обеспечивается поворотом зеркала с регулировкой и подбором скорости сканирования. Скорость вращения поворотного зеркала варьировалась для получения гиперспектральных данных без геометрических искажений из-за наложений или пропусков изображений сканируемого объекта.

Пример гиперспектральных данных, получаемых с помощью МГС со стационарной точки, представлен на рисунках 4 и 5. Сканирование проводилось в направлении, соответствующем горизонтальной оси снимка. Изображения в отдельных каналах, а также результаты синтеза цветного изображения представлены на рисунке 4, а спектральные кривые, соответствующие разным объектам (отмечены на рисунке 4c), представлены на рисунке 5.



Рисунок 4 – Результаты съемок из окна здания: a – изображение на длине волны 610 нм; b – изображение на длине волны 723 нм; c – синтезированное цветное изображение

Figure 4 – The results of filming from the window of the building: a – image at a wavelength of 610 nm; b – image at a wavelength of 723 nm; c – synthesized color image



Рисунок 5 – Измеренные спектры рассеяния неба (1) и отражения зданий (2), кроны деревьев (3) в точках, указанных на рисунке 4*c*

Figure 5 – The measured scattering spectra of the sky (1) and reflectance spectra of buildings (2), crowns of trees (3) in the indicated points in Figure 4c

Цветное изображение было синтезировано на основе стандартного цветового профиля *CIE* 1964 [15] и передает без искажений цвета и форму наблюдаемых объектов. Представленные спектральные кривые, характеризующие три типичные поверхности, также ведут себя предсказуемо: небо (верхний спектр) самое яркое, крона деревьев – самая темная с выраженным подъемом в ближнем ИК-диапазоне.

Заключение

Представлен маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр, предназначенный для регистрации в автономном режиме с борта спутника подстилающей поверхности Земли, и программное обеспечение, обеспечивающее регистрацию, хранение и обработку данных. Достигнуты чрезвычайно малые масса и габариты (3,7 кг, 360 × 130 × 150 мм) для такого класса устройств по сравнению с аналогами.

Анализ существующих систем и собственных разработок средств гиперспектрального дистанционного зондирования Земли показал, что параметры модульного гиперспектрометра максимально близки к характеристикам современных систем дистанционного зондирования и их оптоэлектронных компонентов. А малые габариты и модульная система позволяют устанавливать модульный гиперспектрометр на любой авиакосмический носитель.

В целях проверки работоспособности созданы контрольно-поверочная аппаратура и имитатор космического эксперимента, а также проведены тестовые съемки.

Модульный гиперспектрометр с соответствующими системами позволит решать следующие задачи:

 – реализовать гиперспектральную съемку объектов, как в лабораторных условиях, так и с борта авиакосмических носителей;

 проводить предварительную обработку полученных гиперспектральных изображений;

 исследовать пространственные структуры природно-антропогенных наземных комплексов в режиме мониторинга;

выявлять природные и техногенные источники постоянного воздействия на экологическое состояние регионов;

 проводить отработку и уточнение методов атмосферной коррекции спутниковых изображений для получения наиболее точных данных по отражательным характеристикам земной поверхности;

 выделять различия между близкими классами подстилающих поверхностей.

Сочетание методов оптической спектрометрии, координатной привязки и высокого пространственного разрешения позволит существенно повысить информативность гиперспектральных данных, поэтому создаваемая аппаратура соответствует мировому уровню для выполнения мониторинга поверхности Земли в многочисленных спектральных каналах с малого космического аппарата.

В дальнейшем планируется проведение энергетической калибровки модульного гиперспектрометра в целях перехода от некалиброванных значений аналого-цифрового преобразователя к энергетическим величинам.

Список использованных источников

1. *Ibarrola-Ulzurrun, E.* Assessment of Component Selection Strategies in Hyperspectral Imagery / E. Ibarrola-Ulzurrun, J. Marcello, C. Gonzalo-Martin // Entropy. – 2017. – Vol. 19, iss. 12:666. – P. 1–17.

DOI: 10.3390/e19120666

2. *Tso, B.* Classification Methods for Remotely Sensed Data / B. Tso, P.M. Mather // Taylor and Francis Inc. : New York, USA. – 2009. – 376 p.

3. *Li*, *M*. A review of remote sensing image classification technique: The role of spatio-contextual information / M. Li // Eur. J. Remote Sens. -2014. - No. 47 - P. 389–411.

4. *Sahoo, R.N.* Hyperspectral remote sensing of agriculture / R.N. Sahoo, S.S. Ray, K.R. Manjunath // Current Science. – 2015. – Vol. 108, iss. 5. – P. 848–859.

5. *Das, B.S.* Hyperspectral remote sensing: opportunities, status and challenges for rapid soil assessment in India / B.S. Das [et al.] // Current Science. – 2015. – Vol. 108, iss. 5. – P. 860–868.

6. *Marcello, J.* Seabed Mapping in Coastal Shallow Waters Using High Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery / J. Marcello // Remote Sensing – 2018. – Vol. 10, iss. 8:1208. – P. 1–21.

DOI: 10.3390/rs10081208

7. Аншаков, Г.П. Использование мульти- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования для автоматизированного мониторинга рек и водоемов в весенний период / Г.П. Аншаков, Ю.Н. Журавель, А.В. Ращупкин // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 224–233.

DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-224-233

8. *Родионов, И.Д.* Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования / И.Д. Родионов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 6. – С. 81–93.

DOI: 10.7868/S0205961413060080

9. *Lausch, A.* Scale-specific Hyperspectral Remote Sensing Approach in Environmental Research / A. Lausch [et al.] // Photogramm fernerkun. – 2012. – No. 5. – P. 589–601. **DOI:** 10.1127/1432-8364/2012/0141

10. *Беляев, Б.И.* Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» / Б.И. Беляев [и др.]//Космічнанаука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 41–48.

11. Описание дифракционной решетки компании Horiba [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.horiba.com/ru/scientific/products/diffractiongratings/catalog/flat-field. – Дата доступа: 09.01.2019.

12. *Мартинов, А.О.* Программный комплекс тематической обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли / А.О. Мартинов [и др.] // Электроника инфо. – 2016. – № 3. – С. 55–59.

13. *Katkovsky, L.V.* Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data / L.V. Katkovsky [et al.] // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, iss. 11:1698. – P. 1–18. **DOI:** 10.3390/rs10111698

14. *Heinz, D.C.* Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery / D.C. Heinz, Chein-I-Chang // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39, iss. 3. – P. 529–545. **DOI:** 10.1109/36.911111

15. *Janos, S.* Colorimetry: Understanding the CIE System / S. Janos // Hoboken, Wiley Interscience, 2007. – 460 p.

References

1. Ibarrola-Ulzurrun E., Marcello J., Gonzalo-Martin C. Assessment of Component Selection Strategies in Hyperspectral Imagery. *Entropy*, 2017, vol. 19, iss. 12:666, pp. 1–17. **DOI:** 10.3390/e19120666

2. Tso B., Mather P.M. *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. New York, Taylor and Francis Inc., 2009, 376 p.

3. Li M. A review of remote sensing image classification technique: The role of spatio-contextual information. *Eur. J. Remote Sens.*, 2014, no. 47, pp. 389–411.

4. Sahoo R.N., Ray S.S., Manjunath K.R. Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current Science*, 2015, vol. 108, iss. 5, pp. 848–859.

5. Das B.S., Sarathjith M.C., Santra P., Sahoo R.N., Srivastava R., Routray A., Ray S.S. Hyperspectral remote sensing: opportunities, status and challenges for rapid soil assessment in India. *Current Science*, 2015, vol. 108, iss. 5, pp. 860–868.

6. Marcello J. Seabed Mapping in Coastal Shallow Waters Using High Resolution Multispectral and Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 8:1208, pp. 1–21. **DOI:** 10.3390/rs10081208

7. Anshakov G.P., Zhuravel Yu.N., Raschupkin A.V. [The use of multi- and hyperspectral remote sensing data for automated monitoring of rivers and reservoirs in the spring]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2015, vol. 39, no. 2, pp. 224–233 (in Russian).

DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-224-233

8. Rodionov I.D., Rodionov A.I., Vedeshin L.A., Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P. [Aviation hyperspectral complexes for solving problems of remote

sensing]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth Exploration from Space], 2013, no. 6, pp. 81–93 (in Russian). **DOI:** 10.7868/S0205961413060080

9. Lausch A., Pause M., Merbach I., Gwillym-Margianto S., Schulz K., Zacharias S., Seppelt R. Scale-specific Hyperspectral Remote Sensing Approach in Environmental Research. *Photogramm fernerkun*, 2012, no. 5, pp. 589–601. **DOI:** 10.1127/1432-8364/2012/0141

10. Belyaev B.I., Belyaev Yu.V., Domaratsky A.V., Katkovsky L.V., Mole Yu.A., Rogovets A.V., Khvaley S.V. [Photo-spectral system for the Uragan space experiment]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya* [Cosmic science and technology], 2010, vol. 16, no. 2, pp. 41–48 (in Russian).

11. *Opisaniye difraktsionnoy reshetki kompanii Horiba* [Description of the diffraction grating company Horiba]. Available at: http://www.horiba.com/ru/scientif-ic/products/diffraction-gratings/catalog/flat-field (accessed 01.08.2019).

12. Martinov A.O., Shiryaeva A.D., Ivanov V.A., Ivanov D.A., Pasenyuk A.A., Katkovsky L.V. [Program complex for the thematic processing of the hyperspectral data of remote sensing of the Earth]. *EHlektronika info* [Electronics info], 2016, no. 3, pp. 55–59 (in Russian).

13. Katkovsky L.V., Martinov A.O., Siliuk V.A., Ivanov D.A., Kokhanovsky A.A. Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 11:1698, pp. 1–18.

DOI: 10.3390/rs10111698

14. Heinz D.C., Chein-I-Chang. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, vol. 39, iss. 3, pp. 529–545.

DOI: 10.1109/36.911111

15. Janos S. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Hoboken, Wiley Interscience, 2007, 460 p.

Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов

Л.В. Волкова¹, О.В. Муравьева^{1,2}, В.В. Муравьев^{1,2}, И.В. Булдакова¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 06.12.2018 Принята к печати 04.02.2019

Одним из основных условий безопасной эксплуатации магистральных газопроводов является использование неразрушающих методов контроля, что особенно актуально при решении задач ранней оперативной диагностики материала труб. Цель работы – разработка методик акустической оценки напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала трубопровода и исследование этих характеристик в вырезках магистральных трубопроводов с использованием прибора на основе бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей.

Методики реализуются с использованием структуроскопа СЭМА и бесконтактных преобразователей. В качестве объекта исследований использованы вырезки магистральных газопроводов с кольцевыми сварными швами, с коррозионным растрескиванием под напряжением и без видимых повреждений.

Методика определения плоского напряженно-деформированного состояния элементов трубопровода основана на явлении акустоупругости. Методика определения упругих характеристик материалов и анизотропии их свойств основана на связи скоростей ультразвуковых волн с упругими свойствами среды. Методики реализуются за счет прозвучивания образца с использованием продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимно перпендикулярными поляризациями, совпадающими с главными напряжениями.

Показано, что распределение напряженного состояния является неравномерным, что обусловлено особенностями образцов. Анизотропия свойств большинства образцов находится в диапазоне 12–14 % по модулю сдвига, 9–10 % по модулю Юнга, 13–15 % по коэффициенту Пуассона. Для образцов с коррозионным растрескиванием под напряжением наблюдается резкое уменьшение коэффициента анизотропии, что позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении коррозионного растрескивания под напряжением.

Особенностью предложенных методик является высокая точность, обусловленная отсутствием необходимости определения плотности материала и прецизионного измерения его толщины, погрешность измерения которых известными методами значительна.

Ключевые слова: магистральный газопровод, модули упругости, акустическая анизотропия свойств, двухосное напряженно-деформированное состояние, продольные и поперечные волны.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Л.В. Волкова	L.V. Volkova
Ижевский государственный технический университет	Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
имени М.Т. Калашникова,	Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия e-mail: ludmila396@rambler.ru	e-mail: ludmila396@rambler.ru
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, И.В. Булдакова.	L.V. Volkova, O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev, I.V. Buldakova.
Прибор и методики измерения акустической анизотропии	[Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and
и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов.	the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal].
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
2019. – T. 10, № 1. – C. 42–52.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal

L.V. Volkova¹, O.V. Murav'eva^{1,2}, V.V. Murav'ev^{1,2}, I.V. Buldakova¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia ²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Tatiana Baramzinoy str., 34, Izhevsk 426067, Russia

Received 06.12.2018 Accepted for publication 04.02.2019

Abstract

One of the main conditions of safe operation of gas pipelines is the use of non-destructive diagnostic methods. Particularly important problem is the earlier operational diagnosis of pipes' material of main gas pipelines based on the evaluation of the stress-strain state, elastic moduli and properties anisotropy by acoustic methods. The aim of the work is to develop methods for acoustic assessment of the stress-strain state, the elastic moduli and the properties anisotropy of pipeline material and to study these characteristics in different sections of main pipelines using a device based on contactless *EMA* transducers.

Methods are implemented using specialized equipment (the structurescope *SEMA*) and non-contact electromagnetic acoustic transducers. As an object of research, we used fragments – the cuttings of gas pipelines with circumferential welds both after fabrication and removed from service with stress corrosion cracking, including ones with corrosion damage and without visible damage.

The method of determining the plane stress-strain state of pipeline elements is based on the phenomenon of acoustoelasticity – the dependence of the propagation velocity of ultrasonic waves on mechanical stresses. The method for determining the elastic characteristics of materials and the anisotropy of their properties is based on the relationship between the velocities of ultrasonic waves and the elastic properties of the medium. Both techniques are implemented by sounding the sample in one section using a longitudinal wave and two shear waves with mutually perpendicular polarization planes coinciding with the main stresses, and measuring their propagation times.

It is shown that the stress state distribution both in the circumferential direction and along the generatrix is uneven which is caused by the peculiarities of samples (presence of a welded joint, stress corrosion cracking, long-term operation). The smallest acoustic anisotropy is observed for the Young's modulus. The anisotropy of the properties of most samples is in the range of 12-14 % for shear modulus, 9-10 % for Young's modulus, 13-15 % for Poisson's ratio. For samples with stress corrosion cracking a sharp decrease in the anisotropy coefficient is observed which makes it possible to use the indicated characteristics as informative parameters in detecting stress corrosion cracking.

A feature of the proposed methods is high accuracy, due to the absence of necessity to determine the material density and precision measurement of its thickness, the measurement error of which is significant by known methods.

Keywords: main gas pipeline, elastic moduli, acoustic anisotropy of properties, the biaxial stress-strain state, longitudinal and transversal waves.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Л.В. Волкова	L.V. Voľkova
Ижевский государственный технический университет	Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
имени М.Т. Калашникова,	Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия	e-mail: ludmila396@rambler.ru
e-mail: ludmila396@rambler.ru	
Для цитирования:	For citation:
Л.В. Волкова, О.В. Муравьева, В.В. Муравьев, И.В. Булдакова.	L.V. Volkova, O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev, I.V. Buldakova.
Прибор и методики измерения акустической анизотропии	[Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and
и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов.	the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 42–52.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 42-52 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52

Введение

Одним из основных условий безопасной эксплуатации газопроводов является использование неразрушающих методов контроля, среди которых как традиционно развиваемые методы магнитной внутритрубной диагностики [1], так и перспективные ультразвуковые методы с использованием бесконтактных электромагнитно-акустических преобразователей [2], преобразователей с сухим точечным контактом, низкочастотные акустические методы волноводного контроля [3-4] и другие [5-8]. Большинство методов современного контроля и диагностики ориентировано на выявление дефектов в виде несплошностей, снижающих прочность изделий. Однако, несмотря на высокую техническую и методическую оснащенность неразрушающего контроля объектов трубопроводного транспорта, техногенные аварии продолжаются. Наиболее опасными факторами эксплуатации магистральных газопроводов являются коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), возникающее при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений в металле, и трещины в сварных соединениях. Причиной развития КРН является высокий уровень внутренних структурных напряжений, обусловленных особенностями технологии изготовления трубопроводов, а также механические напряжения, вызванные температурным воздействием окружающей среды и внутренним давлением содержимого газопровода [9]. Трещины в сварном соединении и в зоне термического влияния возникают из-за высокой неоднородности распределения напряжений как по длине, так и поперек шва.

На технологические и эксплуатационные характеристики и деформационное поведение материалов также оказывает влияние коэффициент Пуассона и анизотропия механических свойств (текстурная анизотропия) проката. Известно, что величина коэффициента Пуассона связана с деформационной прочностью, трещиностойкостью и плотностью энергии пластического деформирования при возникновении в материале напряженно-деформированного состояния [10–12].

Анизотропия механических свойств проката приводит к снижению прочности, плохой штампуемости и может явиться причиной появления дефектов. Имеются данные о связи упругой анизотропии материала с его механическими характеристиками (пределы прочности, текучести и относительного удлинения) [13].

Поэтому задача ранней оперативной диагностики, основанной на оценке напряженнодеформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала элементов труб магистральных газопроводов представляется особо актуальной.

Перспективные варианты оценки структурного и напряженно-деформированного состояния металлов связаны с магнитными [14–15] и акустическими методами, основанными на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде [16–20].

К преимуществам акустических методов, основанных на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде, следует отнести возможность определения поверхностных и внутренних напряжений, накопления микроповреждений в объеме материала; многопараметровость контроля за счет многообразия типов используемых волн и регистрируемых параметров; оперативность контроля, достаточно высокую разрешающую способность и возможность проведения измерений непосредственно на контролируемых объектах в процессе эксплуатации. Благодаря использованию упругих волн, возможно получение наиболее достоверных связей со структурно-механическими параметрами материалов изделий.

Целью работы являлась разработка и апробация методик оценки напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и анизотропии свойств материала трубопровода, основанных на использовании трех типов волн различных поляризаций (продольных и поперечных с взаимно перпендикулярной горизонтальной поляризацией), и прибора для их реализации с использованием бесконтактных электромагнитноакустических (ЭМА) преобразователей.

Оборудование

Для исследований использовался специализированный структуроскоп СЭМА (свидетельство об утверждении типа средства измерения *RU.C.*36.003.*А* № 60174). Структуроскоп реализует эхо-импульсный метод и обеспечивает возможность бесконтактного ЭМА возбужденияприема двух поперечных волн ортогональных горизонтальных поляризаций [21]. Усиленные сигналы поступают на плату аналого-цифрового преобразователя (разрядность 12 бит, частота дискретизации) структуроскопа СЭМА и преобразуются в цифровой сигнал, наблюдаемый на экране персонального компьютера. Работа структуроскопа СЭМА производится под управлением специализированного программного обеспечения «Принц».

На рисунке 1 показана серия регистрируемых структуроскопом СЭМА донных эхо-импульсов поперечных горизонтально-поляризованных волн по двум каналам (*a*) и выделенный фрагмент между вторым и третьим донными эхо-импульсами (*b*). С увеличением номера отражения наблюдается пропорциональное расхождение между временами прихода эхоимпульсов по двум каналам.

Высокая частота дискретизации аналого-цифрового преобразования (100 МГц), возможность получения серии многократных отражений и последующая интерполяция обеспечивают точность определения временных интервалов 1,25 нс.

Излучение-прием продольной волны обеспечивался с помощью прямого пьезоэлектрического преобразователя с рабочей частотой 10 МГц, подключаемого к стандартному высокочастотному дефектоскопу *DIO* 1000, особенностью которого является возможность сохранения регистрируемых сигналов (рисунок 1*c*) с частотой дискретизации до 200 МГц, что обеспечивает точность определения временных интервалов 5 нс.

При определении временной задержки продольной волны учитывалось время распространения волны в протекторе и контактной жидкости с использованием эталонной меры СО-2 (отражатель – донная поверхность 59 мм, 20 мкс).

В качестве объекта исследований использованы фрагменты – вырезки магистральных газопроводов диаметрами 1020, 1220, 1420 мм, толщиной стенки 15,6–18,5 мм, изготовленных из стали 09Г2С. Среди исследуемых образцов – вырезки с кольцевыми сварными швами, полученными электродуговой сваркой, после изготовления, а также фрагменты трубопроводов, изъятых из эксплуатации с КРН, коррозионными повреждениями без видимых повреждений (таблица).





Рисунок 1 – Серия донных эхо-импульсов по двум каналам (*a*); выделенный фрагмент между первым и вторым эхо-импульсами, регистрируемыми структуроскопом СЭМА, (*b*); выделенный фрагмент между вторым и третьим донными эхо-импульсами продольных волн, регистрируемых дефектоскопом *DIO* 1000 (*c*)

Figure 1 – A series of bottom echo pulses through two channels (*a*); of transversal waves and a selection between the first and the second echo pulses recorded by the SEMA structuroscope (*b*); bottom echo pulses of longitudinal waves between the second and the third echo pulses recorded by the *DIO* 1000 detector (*c*)

Методика определения плоского напряженно-деформированного состояния

В основу методики определения напряженнодеформированного состояния элементов трубопровода положен метод акустоупругости, основанный на зависимости скоростей распространения ультразвуковых волн от механических напряжений [22].

Оценка двухосных остаточных напряжений при плоском напряженно-деформированном

состоянии в трубах производится согласно ГОСТу Р 52731-2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования». Методика основана на измерении времен распространения продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимноперпендикулярными плоскостями поляризации, совпадающими с главными напряжениями в анизотропном материале, с учетом коэффициентов акустоупругости материала. Осевые σ_1 и окружные σ_2 напряжения определяются согласно формулам:

$$\sigma_{1} = K_{1} \left(\gamma_{0t1,0l} \gamma_{t1,l}^{-1} - 1 \right) - K_{2} \left(\gamma_{0t2,0l} \gamma_{t2,l}^{-1} - 1 \right);$$
(1)

$$\sigma_{2} = K_{1} \left(\gamma_{0t2,0l} \gamma_{t2,l}^{-1} - 1 \right) - K_{2} \left(\gamma_{0t1,0l} \gamma_{t1,l}^{-1} - 1 \right), \qquad (2)$$

где
$$\gamma_{t1,l} = \frac{t_{t1}}{t_l}; \ \gamma_{t2,l} = \frac{t_{t2}}{t_l}; \ \gamma_{t2,t1} = \frac{t_{t2}}{t_{t1}}; \ \gamma_{0t1,0l} = \frac{t_{0t1}}{t_{0l}};$$

 $\gamma_{0t2,0l} = \frac{t_{0t2}}{t_{t1}};$

 t_{t1}, t_{t2}, t_l – значения временных задержек сдвиговых горизонтально-поляризованных волн с вектором поляризации вдоль образующей трубы (в направлении проката) (t_{t1}), вдоль окружности трубы (поперек проката) (t_{t2}) и продольной волны (поляризация по толщине) (t_{l2}); t_{0t1}, t_{0t2}, t_{0l} – нулевые значения временных задержек соответствующих типов волн (в отсутствии напряженно-деформированного состояния); K_1, K_2 – коэффициенты упругоакустической связи материала объекта.

Коэффициенты упругоакустической связи рассчитываются на основе известных модулей упругости Ламе и Мурнагана или могут быть измерены экспериментально. В частности, для труб магистральных газопроводов (сталь 09Г2С) коэффициенты $K_1 = -102$ ГПа, $K_2 = -12$ ГПа [22].

За начальные значения задержек t_{01} , t_{02} и t_{03} могут быть приняты времена, измеренные на предварительно отпущенном образце из исследуемого материала. При отсутствии начальных значений возможно оценить изменение напряженно-деформированного состояния на различных участках исследуемого образца, например относительно минимального (по модулю) напряжения:

$$\frac{\Delta \sigma_{1,2}}{\left|\sigma_{\min 1,2}\right|} = \frac{\sigma_{1,2} - \left|\sigma_{\min 1,2}\right|}{\left|\sigma_{\min 1,2}\right|}.$$
(3)

Благодаря прозвучиванию одного и того же участка с использованием различных типов волн, возможно определение напряжений для участков любой толщины за счет измерения времен их распространения, что существенно уменьшает погрешность оценки. Относительная неисключенная систематическая погрешность определения напряжений δ_σ может быть найдена по правилам вычисления погрешностей при косвенных измерениях из следующего соотношения:

$$\delta_{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial(\sigma)}{\partial t_{i}} \Delta t_{i}\right)^{2}}, \qquad (4)$$

где t_i – измеряемые параметры (времена t_{i1} , t_{i2} , t_l , t_{0l1} , t_{0i2} , t_{0l}); Δt_i – неисключенные систематические погрешности измеряемых параметров времени ($\Delta t_l = 5$ нс, $\Delta t_l = 7$ нс); n – число измеряемых параметров.

Расчеты показывают, что косвенная погрешность определения напряжений с использованием предлагаемой методики составляет $\delta_{\sigma} = 2,5$ %, а изменения напряжений $\delta_{\Delta\sigma} = 0,04$ %. При этом случайная погрешность $\Delta\sigma$ по результатам 5 измерений в одной точке не превышает 0,1%.

Следует отметить, что имеет место неоднородность упругих напряжений по толщине стенки, возникающая как на стадии изготовления, так и при эксплуатации объекта. Измеряемая согласно предлагаемой методике величина времени пробега при прозвучивании толщины стенки трубы различными типами волн характеризует некоторое «эффективное» (усредненное по толщине с отличающимися уровнями напряжений по слоям) значение. Поэтому,согласно методике, следует говорить об оценке усредненных по толщине стенки остаточных напряжений и коэффициентов анизотропии на данном участке.

Методика определения упругих модулей и анизотропии свойств материала

Разрушающие методы по ГОСТу 1497-84 «Металлы. Метод испытаний на растяжение» являются на сегодняшний момент основными методами оценки модулей упругости и анизотропии свойств, обладающими недостаточно высокой точностью их определения. При этом использование указанных методов для материалов и изделий в процессе эксплуатации невозможно. Методика определения упругих характеристик материалов неразрушающими методами описана в [19].

При прозвучивании образца в одном сечении с использованием различных типов волн появляется возможность определения коэффициента Пуассона вне зависимости от толщины образца:

$$v = \frac{1 - 2\gamma^2}{2\left(1 - \gamma^2\right)},\tag{5}$$

где $\gamma^2 = \frac{C_i^2}{C_i^2} = \frac{t_i^2}{t_i^2}$ – отношение скоростей поперечной и продольной волн, пропорциональное отношению времен их распространения.

Использование поперечных волн различной поляризации (вдоль и поперек направления прокатки) позволяет определить анизотропию акустических свойств (по модулю Юнга $\Delta E/E_1$, модулю сдвига $\Delta G/G_1$, коэффициенту Пуассона $\Delta v/v_1$):

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{1 - \gamma_{t2,t1}^2}{(\gamma_{t1,t}^2 - 2)(\gamma_{t2,t1}^2 - \gamma_{t1,t}^{-2})};$$
(6)

$$\frac{\Delta G}{G_1} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = 1 - \frac{t_{t^2}}{t_{t^1}}^2 = 1 - \gamma_{t^2, t^1}^2; \tag{7}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = \frac{4\gamma_{12,1}^2 + 4\gamma_{11,l}^2 + 3\gamma_{12,l}^4 - 4\gamma_{12,l}^2 \gamma_{12,l}^2 - 3\gamma_{11,l}^2 \gamma_{12,l}^2 - 4}{(3\gamma_{12,l}^2 - 4)(\gamma_{12,l}^2 - 1)},$$
(8)

где $v_{1,2}, E_{1,2}, G_{1,2}$ – коэффициент Пуассона, модуль сдвига и модуль Юнга вдоль и поперек направления проката соответственно.

Расчеты показывают, что косвенная погрешность определения анизотропии акустических свойств составляет для $\Delta G/G_1 - 0,05$ %, для $\Delta E/E_1 - 0,03$ %, для $\Delta v/v_1 - 0,04$ %, для абсолютного значения коэффициента Пуассона – 0,006 %. В то время как погрешность определения абсолютных значений упругих модулей Юнга и сдвига согласно формулам (6) – (8) составляет 2 ГПа, 3 ГПа или 1,5 % и 2,5 % соответственно. При этом случайная погрешность по результатам 5 измерений в одной точке не превышает 0,1 %.

Следует отметить, что на абсолютное значение скорости волн влияет микродефектность, накопленные повреждения, структурное состояние металла. Предлагаемая методика за счет измерения разности времен пробега трех типов волн по одному участку позволяет не учитывать ряд мешающих факторов, имеющих место при измерении абсолютного значения скорости.

Результаты и их обсуждение

Напряженно-деформированное состояние

Результаты оценки относительного распределения остаточных напряжений по площади вырезки для некоторых из исследованных образцов иллюстрирует рисунок 2. По площади образцов распределение напряженного состояния как в осевом направлении σ_1 , так и в окружном направлении σ_2 является весьма неравномерным и различается для образцов со сварным швом и

при наличии КРН. Наличие коррозионного растрескивания в образцах № 1 и № 3 привело к существенному изменению распределения напряженного состояния. Образец № 1, частично (справа) зачищенный от КРН, привел к снижению напряжений в этой области, в отличие от зоны КРН, где напряжения значительно выше. Отметим, что осевые напряжения в зонах КРН с ориентацией трещин вдоль огибающей существенно выше окружных, что объясняется концентрацией осевых растягивающих напряжений трещинами КРН. Образец № 3 обладает значительным коррозионным растрескиванием по всей площади, что привело к крайне неравномерному распределению напряженного состояния по окружности трубы, при этом напряженное состояние по образующей трубы не претерпевает существенных изменений. Для образца со сварным соединением № 9 наблюдается снижение напряжений (как окружных, так и осевых) в зоне термовлияния в сравнении с напряженным состоянием при удалении от сварного шва, что объясняется снятием напряжений в зоне термовлияния и не противоречит результатам измерений остаточных напряжений в зоне сварного шва. Образец № 7 с поверхностной коррозией также характеризуется существенной неравномерностью по площади образца. Следует отметить, что для всех исследованных образцов неравномерность осевых напряжений преобладает над изменением окружных напряжений.

Упругие модули и анизотропия свойств

Результаты определения коэффициентов Пуассона вдоль и поперек направления проката, а также анизотропии акустических свойств, осредненных по всем секторам, представлены в таблице. Отклонение от рассчитанных средних значений не превышало 2,5 %.

Наименышая акустическая анизотропия имеет место для модуля Юнга, характеризующего сопротивление деформации растяжениясжатия. Более высокие значения акустической анизотропии характерны для модуля сдвига, описывающего сопротивление сдвиговым деформациям и коэффициента Пуассона, описывающего сопротивление поперечным деформациям. Исследования показывают, что анизотропия свойств большинства образцов находится в диапазоне 12–14 % по модулю сдвига, 9–10 % – по модулю Юнга, 13–15 – по коэффициенту Пуассона.





Figure 2 – Relative change of stress state in the longitudinal (axial) and transverse (in the envelope) direction over the area of main gas pipelines' samples in percent: a – sample no 1 with stress-corrosion cracking; b – sample no 3 with stress-corrosion cracking; c – sample no 9 with annular weld; d – sample no 7 with surface corrosion

Полученные значения не противоречат измеренным данным по модулям упругости в различных кристаллографических направлениях и эквивалентны значениям, приведенным в [2].

Таблица/Table

Упругие модули и анизотропия акустических свойств исследуемых образцов Elastic moduli and anisotropy of the acoustic properties of the samples under study

№ Образца No of the sample	Внешний диаметр/Толщина стенки, мм Outer diameter/Wall thickness, mm Xapaктеристика образца Characteristics of the sample	$\overline{\nu}_1$	$\overline{\nu}_2$	$\frac{\Delta \overline{G}}{\overline{G_1}},\%$	$\frac{\Delta \overline{E}}{\overline{E_1}},\%$	$\frac{\Delta \overline{v}}{\overline{v_1}}, \%$
1	1020/17,7 КРН, изъят из эксплуатации SCC, removed from service	0,259	0,290	9	7	12
2	1220/18,5 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,248	0,286	12	10	14
3	1220/15,9 КРН, изъят из эксплуатации SCC, removed from service	0,276	0,297	7	7	7
4*	1220/16 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,257	0,296	13	9	13
5	1420/15,6 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,246	0,291	12	10	15
6	1420/15,7 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,247	0,290	14	9	15
7*	1420/15,7 С поверхностной коррозией, изъят из эксплуатации Surface corrosion, removed from service	0,249	0,293	12	9	15
8	1420/16 Без видимых повреждений, изъят из эксплуатации No visible damage, removed from service	0,247	0,291	14	10	15
9*	1420/18,5 КСС, ЭС, без эксплуатации Annular weld, arc welding, without exploitation	0,246	0,285	12	10	14

* проведены измерения напряженно-деформированного состояния

* measurements of the stress-strain state

КСС – кольцевой сварной шов; ЭС – электродуговая сварка

CW - cup weld; EAW - electric-arc welding

Исключение составляют образцы с КРН (№ 1 и № 3), в которых наблюдается существенное уменьшение коэффициента анизотропии по всем трем упругим модулям, при этом наибольшее отклонение соответствует модулю сдвига и коэффициенту Пуассона. Последнее позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении КРН. Согласно [17] размер и форма зерен, искажения в кристаллической решетке материала влияют на модули упругости, поэтому предложенные параметры могут использоваться в качестве тонкого инструмента для оценки микроструктуры материала.

Заключение

Разработанные методики, основанные на использовании трех типов волн различных поляризаций (продольных и поперечных с взаимно-перпендикулярной горизонтальной поляризацией), и прибор для их реализации с использованием бесконтактных ЭМА-преобразователей обеспечивают оценку двухосного напряженно-деформированного состояния, упругих модулей и их анизотропии.

Измеряемая согласно предлагаемой методике величина времени пробега при прозвучивании толщины стенки трубы различными типами волн характеризует некоторое «эффективное» (усредненное по толщине с отличающимися уровнями напряжений по слоям) значение.

Особенностью предложенных методик является высокая точность, обусловленная отсутствием необходимости определения плотности материала и прецизионного измерения его толщины, погрешность в измерении которых известными методами значительна.

Предложенные методика и прибор апробированы на образцах – вырезках магистральных трубопроводов. Результаты экспериментальных исследований образцов магистральных газопроводов позволили оценить влияние зоны сварного соединения, коррозионного растрескивания и эксплуатации на распределение остаточных напряжений. Показано, что для образцов с коррозионным растрескиванием под напряжением наблюдается резкое уменьшение коэффициента анизотропии, что позволяет использовать указанные характеристики в качестве информативных параметров при выявлении коррозионного растрескивания под напряжением.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) в части разработки методики и исследований напряженно-деформированного состояния; по проекту № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерства науки и высшего образования ФБГОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» на 2017–2019 гг.

Список использованных источников

1. *Мелёхин, О.Н.* Автоматизированный неразрушающий контроль магистральных газопроводов с применением наружных сканеров дефектоскопов / О.Н. Мелёхин [и др.] // Газовая промышленность. – 2015. – № S2(724). – С. 44–48.

2. *Matvienko, A.F.* The quality control of underground gas pipelines via the electromagnetic and acoustic method / A.F. Matvienko [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 9. – P. 546–553.

DOI: 10.1134/S1061830915090077

3. *Wenbo Duan* Spectral subtraction and enhancement for torsional waves propagating in coated pipes / Wenbo Duan [et al.] // NDT & E International. – 2018. – Vol. 100. – P. 55–63.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.08.009

4. *Murav'eva*, *O.V.* Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines / O.V. Murav'eva, S.A. Murashov, S.V. Len'kov // Acoustical Physics. – 2016. – Vol. 62, no. 1. – P. 117–124.

DOI: 10.7868/S032079191506009X

5. *Davydov*, *V.V.* A contactless method for testing inner walls of pipelines / V.V. Davydov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 213–221. **DOI:** 10.1134/S1061830918030051

6. *Hyung, M.K.* Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform / M.K. Hyung, C. Doo-Hyun // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 3. – P. 175–183. **DOI:** 10.1134/S1061830916030049

7. Краснов, А.Н. Прогнозирование динамических нагрузок в газопроводах на основе методов идентификации / А.Н. Краснов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 4. – С. 83–88.

8. *Тымчик, Г.С.* Алгоритм обработки данных системы контроля монтажа клеесварной муфты на магистральном трубопроводе / Г.С. Тымчик, А.А. Подолян // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 63–67. 9. Басиев, К.Д. Влияние упругой энергии сжатого газа на развитие коррозионных и коррозионно-механических трещин в магистральных газопроводах / К.Д. Басиев [и др.] // Газовая промышленность. – 2018. – № 7(771). – С. 96–100.

10. *Gonchar, A.V.* Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining / A.V. Gonchar [et al.] // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 62, no. 4. – P. 537–541. **DOI:** 10.1134/S1063784217040089

11. *Mishakin, V.V.* Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel / V.V. Mishakin, V.A. Klyushnikov, A.V. Gonchar // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 60, no. 5. – P. 665– 668. **DOI:** 10.1134/S1063784215050163

12. *Мишакин, В.В.* Измерение характеристик текстуры конструкционной стали 15ЮТА акустическим методом при усталостном разрушении / В.В. Мишакин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 7. – С. 30–34.

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-30-34

13. *Murav'eva, O.V.* Methodological peculiarities of using sh- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats / O.V. Murav'eva, V.V. Murav'ev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 7. – P. 363–369. **DOI:** 10.1134/S1061830916070056

14. *Матюк, В.Ф.* Контроль качества термообработки изделий из конструкционных среднеуглеродистых сталей на основе двухполярного импульсного перемагничивания / В.Ф. Матюк, В.А. Бурак // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 57–62.

15. *Filinov, V.V.* Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal / V.V. Filinov, A.N. Kuznetsov, P.G. Arakelov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, no. 1. – P. 51–61. **DOI:** 10.1134/S1061830917010065

16. *Uglov, A.L.* On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method / A.L. Uglov, A.A. Khlybov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 4. – P. 210–216. **DOI:** 10.1134/S1061830915040087

17. *Smirnov, A.N.* Acoustic evaluation of the stressstrained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input / A.N. Smirnov [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, no. 1. – P. 37–43. **DOI:** 10.1134/S1061830918010072

18. *Муравьев, В.В.* Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В.В. Муравьев [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 13–23. **DOI:** 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

19. *Babkin, S.E.* The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method / S.E. Babkin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no. 5. – P. 303–307.

DOI: 10.1134/S1061830915050022

20. *Murav'ev, V.V.* Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of lamb waves / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, L.V. Volkova // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46, no. 10. – P. 752–756. **DOI:** 10.3103/S0967091216100077

21. Стрижак, В.А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В.А. Стрижак [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 243–250.

22. *Nikitina, N.E.* Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines / N.E. Nikitina, A.V. Kamyshev, S.V. Kazachek // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45, iss. 12. – P. 861–866. **DOI:** 10.1134/S1061830909120043

Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10122) in the part of technique's development and research of residual stresses; and by the Ministry of Science and Higher Education in the frame of the project no. 3.5705.2017/6.7 of the state order for Kalashnikov Izhevsk State Technical University for the period of 2017–2019.

References

1. Melehin O.N., Vjalyh I.L., Lazarev V.L., Zotov D.A., Remizov A.E., Lipovik A.V., Dejneko S.V. [Major gas pipeline automated nonintrusive testing practices using external flaw locator scanners]. *Gazovaja promyshlennost'* [Gas Industry], 2015, no. S2(724), pp. 44–48 (in Russian).

2. Matvienko A.F., Loskutov V.E., Babkin S.A., Korzunin G.S. The quality control of underground gas pipelines via the electromagnetic and acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, Vol. 51, no. 9, pp. 546–553. **DOI:** 10.1134/S1061830915090077

3. Duan W., Kanfoud J., Deere M., Mudge P., Gan T.-H. Spectral subtraction and enhancement for torsional waves propagating in coated pipes. *NDT & E International*, 2018, vol. 100, pp. 55–63.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.08.009

4. Murav'eva O.V., Murashov S.A., Len'kov S.V. Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines. *Acoustical Physics*, 2016, vol. 62, no 1, pp. 117–124. **DOI:** 10.7868/S032079191506009X

5. Davydov V.V., Myazin N.S., Logunov S.E., Fadeenko V.B. A contactless method for testing inner walls of pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 213–221.

DOI: 10.1134/S1061830918030051

6. Hyung M.K., Doo-Hyun C. Defects detection of gas pipeline near the welds based on self quotient image and discrete cosine transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 175–183. **DOI:** 10.1134/S1061830916030049

7. Krasnov A.N. [Forecasting dynamic loads in gas pipelines based on identification methods]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual Systems in Manufacturing], 2017, vol. 15, no. 4, pp. 83–88 (in Russian).

8. Tymchik G.S., Podolian A.A. [Monitoring system data processing algorithm of weld-bonded coupling installation of the main pipelines]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, vol. 8, no. 1, pp. 63–67 (in Russian).

9. Basiev K.D., Dzioev K.M., Alborov A.D., Dzutsev T.M. [Influence of elastic strain energy of compressed gas on the development of corrosion and mechanical-corrosion cracks in the main gas pipelines]. *Gazovaja promyshlennost'* [GAS Industry of Russia], 2018, no. 7(771), pp. 96–100 (in Russian).

10. Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V. Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 537–541.

DOI: 10.1134/S1063784217040089

11. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 665–668.

DOI: 10.1134/S1063784215050163

12. Mishakin V.V., Serebryany V.N., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A. [Acoustic study of the texture characteristics of 15YuTA construction steel in fatigue failure conditions]. *Zavodskaja laboratorija*. *Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory], 2018, vol. 84, no. 7, pp. 30–34 (in Russian).

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-30-34

13. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using sh- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats. *Russian Journal of*

Nondestructive Testing, 2016, vol. 52, no. 7, pp. 363–369. **DOI:** 10.1134/S1061830916070056

14. Matyuk V.F., Burak V.A. [Quality testing of heat treatment of medium-carbon steel construction items based on the bipolar pulsed remagnetization]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, vol. 8, no. 1, pp. 57–62 (in Russian).

15. Filinov V.V., Kuznetsov A.N., Arakelov P.G. Monitoring stressed state of pipelines by magnetic parameters of metal. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 51–61.

DOI: 10.1134/S1061830917010065

16. Uglov A.L., Khlybov A.A. On the inspection of the stressed state of anisotropic steel pipelines using the acoustoelasticity method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 210–216.

DOI: 10.1134/S1061830915040087

17. Smirnov A.N., Knyazkov V.L., Abakov N.V., Ozhiganov E.A., Koneva N.A., Popova N.A. Acoustic evaluation of the stress-strained state of welded carbon steel joints after different modes of heat input. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37–43. **DOI:** 10.1134/S1061830918010072

18. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [Investigations of the structural and strain-stress state of the rails of current production by the acoustic elasticity method]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13–23 (in Russian).

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23

19. Babkin S.E. The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303–307. **DOI:** 10.1134/S1061830915050022

20. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of lamb waves. Steel in Translation, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752–756.

DOI: 10.3103/S0967091216100077

21. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov S.A., Efremov A.B. [The information and measuring system for excitation, detection, registration and processing of signals from electromagnetic-acoustic transducers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual Systems in Manufacturing], 2011, no. 1(17), pp. 243–250 (in Russian).

22. Nikitina N.E., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, vol. 45, no. 12, pp. 861–866. **DOI:** 10.1134/S1061830909120043

УДК 621.039

Измерение температурного и напряженнодеформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций

С.М. Дмитриев¹, Р.Р. Рязапов¹, А.В. Мамаев¹, А.Е. Соборнов¹, А.В. Котин¹, М.А. Легчанов¹, А.В. Львов²

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

²Федеральный научно-производственный центр АО «Научно-производственное предприятие «Полет», пл. Комсомольская, 1, г. Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила 30.10.2018

Принята к печати 24.01.2019

Обеспечение ресурса теплообменного оборудования водоохлаждаемых реакторных установок при случайных пульсациях температуры является важной научно-технической задачей атомной энергетики. Наиболее опасны термопульсации, вызываемые смешением потоков рабочих сред при высоких градиентах температуры. Целью работы являлось экспериментальное исследование температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных термопульсаций, обусловленных смешением потоков теплоносителя.

Для решения поставленных задач изготовлен тройниковый узел типа «встречный впрыск», включенный в состав теплофизического исследовательского стенда. Конструкция узла позволяет проводить исследования теплогидравлических и ресурсных характеристик трубных образцов 60×5 мм, изготовленных из сталей аустенитного класса. Разработаны средства измерения температурного, напряженно-деформированного состояний трубного образца и температурного поля потока теплоносителя в зоне смешения однофазных сред с различной температурой. Измерительные модели оснащены микротермопарами и тензорезисторами.

В результате исследований получены массивы экспериментальных данных, содержащих реализации термопульсаций, осредненные во времени профили температуры потока и наружной поверхности трубного образца, статистические и спектрально-корреляционные характеристики термопульсаций. По результатам измерения относительных деформаций определены значения усталостных напряжений.

Разработаны устройства и методики исследования. Установлены комбинации режимных параметров, обеспечивающих термосиловое нагружение поверхности металла с наиболее высоким уровнем амплитуд переменных напряжений. Полученные данные используются для верифицирования метода оценки усталостной долговечности конструкционных материалов реакторных установок при случайных термопульсациях.

Ключевые слова: температурные пульсации, термоусталость, ресурс, тройниковый узел.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Р.Р. Рязапов	R.R. Ryazapov
Нижегородский государственный технический университет	Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
имени Г.Е. ллексеева, ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия в. mail: прогатор Кара(Дата), сот	minin str., 24, Niznny Novgoroa 605950, Kussia e-mail: ryazapov.renat@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязапов, А.В. Мамаев, А.Е. Соборнов,	S.M. Dmitriev, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, A.E. Sobornov,
А.В. Котин, М.А. Легчанов, А.В. Львов.	A.V. Kotin, M.A. Legchanov, A.V. Lvov.
Измерение температурного и напряженно-	[Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample
деформированного состояний трубного образца	under the Local Stochastic Temperature Pulsations].
при воздействии локальных стохастических	Devices and Methods of Measurements.
температурных пульсаций.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 53–60 (in Russian).
Приборы и методы измерений.	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60
2019. – T. 10, № 1. – C. 53–60.	
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60	

Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample under the Local Stochastic Temperature Pulsations

S.M. Dmitriev¹, R.R. Ryazapov¹, A.V. Mamaev¹, A.E. Sobornov¹, A.V. Kotin¹, M.A. Legchanov¹, A.V. Lvov²

¹*R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Minin st., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

²Federal Research and Production center Joint Stock Company «Research and Production Company «Polyot», Komsomolskaya sq., 1, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 30.10.2018 Accepted for publication 24.01.2019

Abstract

Provding a high level of durability of heat exchange equipment of water-cooled reactors under local stochastic temperature pulsations is an important scientific and technical problem for the nuclear power industry. Temperature pulsations produced by mixing non-isothermal coolant flows with high temperature gradient are most dangerous. This work is an experimental study of temperature and stress-strain state of a tube sample under local stochastic temperature pulsations caused by mixing of coolant flows.

To solve the problems posed, a *Y*-junction with «counter injection» was built, which was included in the thermal-hydraulic research facility. The design of the *Y*-junction allows study of the thermal-hydraulic characteristics and durability of tube samples made of austenitic steel of 60×5 MM. Some tube samples had developed for measuring the temperature, stress-strain state of tube material and temperature field of coolant flow in mixing zone of single-phase coolants with different temperatures. Measuring tube samples were equipped with micro thermocouples and strain gauges.

The experimental data of temperature pulsations, time-averaged temperature field in the coolant flow and on the outer surface of the sample were obtained, and statistical and spectral correlation characteristics of temperature pulsations were analyzed. According to results of measuring the relative strain, values of stresses were calculated.

Devices and research techniques are developed. The combination of coolant flows parameters that provide thermal load of the metal surface at the highest level of stress intensity amplitude was obtained. The study results are used to verify the method for evaluating fatigue of reactor installations materials under stochastic temperature pulsations.

Keywords: temperature pulsations, thermal fatigue, metal durability, *Y*-junction.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Р.Р. Рязапов	R.R. Ryazapov
Нижегородский государственный технический университет	Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
имени Р.Е. Алексеева,	Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия	e-mail: ryazapov.renat@gmail.com
e-mail: ryazapov.renat@gmail.comy	
Для цитирования:	For citation:
С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязапов, А.В. Мамаев, А.Е. Соборнов,	S.M. Dmitriev, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, A.E. Sobornov,
А.В. Котин, М.А. Легчанов, А.В. Львов.	A.V. Kotin, M.A. Legchanov, A.V. Lvov.
Измерение температурного и напряженно-	[Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample
деформированного состояний трубного образца	under the Local Stochastic Temperature Pulsations].
при воздействии локальных стохастических	Devices and Methods of Measurements.
температурных пульсаций.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 53-60 (in Russian).
Приборы и методы измерений.	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60
2019. – T. 10, № 1. – C. 53–60.	
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60	

Введение

Оборудование ядерных реакторных установок (ЯРУ) в силу особенностей эксплуатации, а также высокой теплонапряженности подвержено нестационарным термосиловым воздействиям, характеризующимся высокой интенсивностью [1]. Данные воздействия, являющиеся следствием пульсаций температуры теплоносителя, оказывают негативное влияние на ресурсные характеристики оборудования. Причины возникновения пульсаций температуры имеют различную природу. Особый интерес в последние годы представляют термопульсации, сопровождающие процессы смешения рабочих сред водоохлаждаемых реакторных установок (РУ). В открытой печати встречается большое количество публикаций, посвященных исследованию смешения потоков теплоносителя в Т-образном [2-6] и других тройниковых соединениях различных конструкций [7-8]. В большинстве своем эти работы объединяет применение бесконтактных методов измерения полей температуры и скорости таких, как инфракрасная термография, цифровая трассерная визуализация (английская аббревиатура PIV) и др. Бесконтактные полевые методы позволяют получать результаты измерений в наиболее подходящем для сопоставления с результатами расчетов программ вычислительной гидродинамики (английская аббревиатура CFD) виде. Однако их применение накладывает ряд существенных ограничений на режимные параметры исследования, материалы экспериментальных моделей и др. Низкий температурный градиент смешиваемых потоков теплоносителя, использование оптически проницаемых или, в ряде случаев, тонкостенных материалов не позволяют получить данные о процессах накопления повреждений в элементах конструкций в обозримом временном интервале.

Таким образом, исследование влияния локальных стохастических температурных пульсаций, обусловленных смешением теплоносителей с различной температурой, на ресурсные характеристики конструкционных материалов ЯРУ является актуальным. Целью работы являлось определение характеристик температурного и напряженно-деформированного состояний экспериментальной модели (ЭМ), а также характеристик термопульсаций в потоке теплоносителя в условиях натурного термосилового нагружения с применением измерительных моделей, оснащенных микротермопарами и тензорезисторами.

Теплофизический стенд

Экспериментальное исследование проводилось на теплофизическом стенде, предназначенном для исследования процессов тепло- и массопереноса, теплогидравлических и ресурсных характеристик элементов теплообменного оборудования. Гидравлическая часть стенда включает в себя контур теплоносителя (рисунок 1) и контур охлаждения основного оборудования контура теплоносителя. В качестве теплоносителя использована дистиллированная вода ГОСТ 6709-72. Рабочей средой контура охлаждения является вода из системы холодного водоснабжения.

В состав контура теплоносителя входят следующие основные элементы: циркуляционный насос; электрический нагреватель; теплообменник охлаждения теплоносителя; система параллельных каналов; система компенсации давления с устройством контроля уровня и предохранительным клапаном; система подпитки контура теплоносителя; запорно-регулирующая арматура для организации, необходимой по условиям эксперимента, схемы движения теплоносителя; контрольно-измерительные приборы (КИП). Оборудование и трубопроводы стенда выполнены из стальных труб 34×4 мм и 14×2 мм марки 12Х1Н10Т.

Система параллельных каналов включает в себя раздающие коллекторы «горячего» и «холодного» потоков теплоносителя, собирающий коллектор, тройниковые узлы типа «встречный впрыск» (рисунок 2), запорную арматуру, КИП и дроссельные устройства для поддержания одинаковых значений расходов смешиваемых сред в каналах.

Тройниковый узел состоит из основной $60 \times 5 \times 226$ мм, периферийной $9 \times 1,5$ мм труб и разъемных соединений. Материал труб – сталь марки 12Х18Н10Т. В направляющем фланце выполнен диффузор с углом раскрытия 40°. Расстояние от выходной кромки диффузора до передней кромки периферийной трубы составляет 102 мм. Угол наклона периферийной трубы по отношению к основной составляет 18°. Расстояние от среза периферийной трубы до внутренней стенки основой – 7 мм. Основная труба – ЭМ, подвержена температурному нагружению.



Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда: 1 – насос контура теплоносителя; 2 – электрический нагреватель; 3 – охладитель; 4 – система параллельных каналов; 5 – компенсатор давления; 6 – бак запаса дистиллята; 7 – подпиточный насос

Figure 1 – Scheme of the facility: 1 – coolant circuit pump; 2 – electric heater; 3 – heat exchanger; 4 – system of parallel channels; 5 – pressure compensator; 6 – distillate tank; 7 – high pressure pump



Рисунок 2 – Тройниковый узел: 1 – экспериментальная модель; 2 – направляющий фланец; 3 – фланец накидной; 4 – периферийная труба; 5 – фланец

Figure 2 – *Y*-junction: 1 – tube sample; 2 – guide flange; 3 – flange cap; 4 – injection tube; 5 – flange

Организация локального термоциклирования внутренней стенки ЭМ осуществляется путем подачи в поток горячего теплоносителя холодного потока теплоносителя из периферийной трубы. Конструктивное исполнение тройникового узла за счет разъемных соединений обеспечивает установку экспериментальных либо измерительных моделей. В данной работе использовались следующие измерительные модели:

 модель измерительная температурного поля в потоке теплоносителя (МИТП(п)); – модель измерительная температурного поля наружной поверхности стенки трубы (МИТП(с));

 модель измерительная напряженно-деформированного состояния (МИНДС).

Материал и габаритные характеристики МИТП(п), МИТП(с), МИНДС и ЭМ идентичны.

Средства измерения

Получение экспериментальных реализаций пульсаций температуры теплоносителя в зоне смешения осуществлялось с применением МИТП(п). Схема размещения датчиков приведена рисунке 3. Измерительная модель оснащена комплектом из восьми микротермопар (tf1-tf8), изготовленных из кабеля термопарного в минеральной изоляции стального (КТМС) с индивидуальной градуировочной характеристикой. Материал чехла кабеля – нержавеющая сталь. Погрешность градуировки ±0,2 °С. Для уменьшения показателя тепловой инерции чувствительная часть датчика прокатана до диаметра 0,5 мм по технологии предприятия изготовителя (АО «ОКБМ Африкантов»). Термопары установлены в центральной части трубы вдоль нижней образующей на расстоянии 10 мм друг от друга. Датчики ориентированы перпендикулярно основному потоку и находятся на расстоянии 1 мм от внутренней поверхности стенки.



Рисунок 3 – Схема расположения термопар на измерительной модели температурного поля потока теплоносителя

Figure 3 – Design of the model for coolant temperature field measuring

Термопара *tf*3 расположена вблизи передней относительно направления движения основного потока кромки периферийной трубы. Зона расположения датчиков измерительных моделей выбрана из условий полного охвата области смешения теплоносителей. Термопары установлены с помощью приваренных к наружной поверхности штуцеров, а их выводы запаяны техническим серебром ПСР40.

Измерение температуры на наружной поверхности основной трубы осуществлялось при помощи МИТП(с) (рисунок 4). Модель оснащена датчиками, изготовленными из кабеля КТМС с диаметром чувствительной части 1 мм. Погрешность измерения составила ±1,5 °С.

Термопары tw1-tw8 размещены соответственно термопарам tf1-tf8 и закреплены на наружной поверхности модели пластинами из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм при помощи точечной сварки.

МИНДС оснащена тремя термопарами, изготовленными из кабеля КТМС с диаметром чувствительной части 1 мм и одиннадцатью тензорезисторами (рисунок 5). Датчики установлены на наружной поверхности трубы. В составе измерительной модели применены тензорезисторы на основе тонких пленок TML – тип ZFLA-3-11. Погрешность измерения относительной деформации ± 44·10⁻⁶. Термопары использованы для определения поправочных коэффициентов, компенсирующих температурные эффекты тензодатчиков.



Рисунок 4 – Схема расположения термопар на измерительной модели температурного поля стенки Figure 4 – Design of the model for wall temperature field measuring



Рисунок 5 – Схема расположения датчиков на измерительной модели напряженно-деформированного состояния: *tr*1–*tr*11 – тензорезисторы; *t*1–*t*3 – термопреобразователи

Figure 5 – Design of the model for relative strain measuring: tr1-tr11 – strain gauges; t1-t3 – thermocouple

Методика экспериментального исследования

Методика проведения экспериментального исследования заключалась в последовательном выполнении следующих действий:

 – организация циркуляции «горячего» потока через измерительные модели, «холодного» – по обводной линии (посредством коммутации запорной и регулирующей арматуры);

 – обеспечение и поддержание режимных теплофизических параметров «горячего» и «холодного» потоков с последующей организацией впрыска «холодного»;

 стабилизация теплофизических параметров, ожидание окончания переходных процессов;

– запись временных реализаций полей температуры потока теплоносителя и стенки измерительных моделей, относительных деформаций материала стенки, расходов «горячего» и «холодного» потоков теплоносителя, расчет их статистических и спектрально-корреляционных характеристик.

При проведении эксперимента измерительные модели поочередно устанавливались в каждый из трех каналов для подтверждения идентичности условий термоциклического нагружения. Измерение напряженно-деформированного состояния материала, кроме номинального режима работы, проводилось на этапах опрессовки стенда, выхода на режим и при остановке стенда.

Исследование проводилось при следующих режимных параметрах:

– давление в контуре теплоносителя 10 МПа;

– температура «горячего» потока теплоносителя (T_h) 285 °C;

– температура «холодного» потока теплоносителя (T_c) 35 °C;

– диапазон чисел Рейонольдса (Re_h) для «горячего» потока теплоносителя 4,5·10⁴...5,5·10⁴;

– диапазон чисел Рейонольдса (Re_c) для «холодного» потока теплоносителя $10^3 \dots 2 \cdot 10^3$.

Измерение теплофизических параметров осуществлялось посредством системы теплотехнического контроля стенда. В состав системы входят: преобразователи температуры, давления, дифференциального давления и температуры, расхода, установленные на подводных участках системы параллельных каналов. Регистрация и оперативная обработка экспериментальной информации осуществлялась измерительно-вычислительным комплексом стенда «Дата процессор 4.1 ИЯЭиТФ», разработанным на базе блока коммутации и измерения Agilent 34980A и персонального компьютера. Запись динамических параметров измерительных моделей осуществлялась с частотой 8 Гц. Пакет прикладных программ для персонального компьютера разработан членами исследовательского коллектива.

Результаты исследования

По экспериментальным реализациям (рисунок 6*a*, *b*) определены статистические (рисунок 7*a*, *b*) и спектрально-корреляционные характеристики температурного поля и напряженнодеформированного состояний в зоне смешения потоков. На рисунке 7 на оси абсцисс отмечены координаты расположения термопар МИТП(п) и МИТП(с). В качестве условного нуля принята точка, отстоящая на 10 мм от места установки tf1(tw1).



Рисунок 6 – Экспериментальная реализация пульсаций: a – температуры; b – относительной деформации Figure 6 – Experimental data: a – temperature pulsations; b – relative deformations

Максимальная интенсивность пульсаций температуры зарегистрирована термопарой *tf*4. Наибольший размах термопульсаций в потоке теплоносителя составил 147 °С. Энергия пульсаций температуры в зоне смешения, а именно под срезом периферийной трубы, равномерно распределена в рассмотренном диапазоне частот, что соответствует случайному стохастическому процессу.



Рисунок 7 – Статистические характеристики пульсаций температуры: *а* – осредненный по времени профиль температуры; *b* – интенсивность (среднеквадратическое отклонение) пульсаций температуры

Figure 7 – Statistical characteristics of temperature pulsations: a – time-averaged temperature; b – intensity (standart deviation) of temperature pulsations

По результатам, полученным на МИНДС, было оценено напряженно-деформированное состояние образца при различных режимах течения теплоносителя. Максимальное значение усталостных напряжений в области нагружения составило 152 МПа.

Заключение

Разработаны и апробированы измерительные модели температурного, напряженнодеформированного состояний трубного образца 60 × 5 мм и температурного поля потока теплоносителя в зоне смешения однофазных сред с различной температурой. Модели оснащены микротермопарами и тензорезисторами и позволяют проводить измерения при экстремальных значениях температурного напора (до 300 °C) смешиваемых потоков однофазного теплоносителя. Конструкция тройникового узла позволяет проводить ресурсные испытания трубных образцов при совместном использовании измерительных моделей.

Разработана и апробирована методика проведения исследования.

Смоделировано нагружение экспериментальных моделей температурными пульсациями при параметрах теплоносителей, аналогичных штатным параметрам кассеты парогенератора ядерных реакторных установок. В результате экспериментальных работ решены следующие задачи:

 – получены экспериментальные данные по температурному полю в зоне смешения;

 – определено напряженно-деформированное состояние экспериментального образца.

Экспериментально установлено, что комбинация режимных параметров $T_h = 285$ °C, $\text{Re}_h = 5,3 \cdot 10^4$, $T_c = 35$ °C, $\text{Re}_c = 1,1 \cdot 10^3$ обеспечивает термосиловое нагружение поверхности металла с наиболее высоким уровнем амплитуд переменных напряжений и, как следствие, быстрые темпы накопления повреждений.

Полученные опытные данные используются для верифицирования метода оценки усталостной долговечности материалов ЯРУ применительно к аустенитной стали 12Х18Н10Т при воздействии случайных термоциклических нагрузок.

Благодарности

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

Список использованных источников

1. *Судаков, А.В.* Ресурс энергооборудования при пульсациях температур / Судаков А.В. // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – Т. 1, № 2. – С. 10–18.

2. *Dahlberg, M.* Development of a European procedure for assessment of high cycle thermal fatigue in light water reactors / M. Dahlberg [et al.] // Final Report of the NESC-Thermal Fatigue Project, EUR 22763 EN, ISSN 1018-5593, 2007.

3. *Kuschewski*, *M*. Experimental setup for the investigation of fluid-structure interactions in a T-junction / M. Kuschewski, R. Kulenovic, E. Laurien // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 264. – P. 223–230. **DOI:** 10.1016/j.nucengdes.2013.02.024

4. *Smith, B.L., Mahaffy, J.H., Angele, K., Westin, J.* Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction Benchmark exercise. – 2011.

5. *Zboray, R.* On the relevance of low side flows for thermal loads in Tjunctions / R. Zboray, H.-M. Prasser // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – P. 2881–2888. **DOI:** 10.1016/j.nucengdes.2011.05.002

6. *Kickhofel, J.* Turbulent penetration in T-junction branch lines with leakage flow / J. Kickhofel, V. Valori, H.-M. Prasser // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 276. – P. 43–53.

DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.05.002

7. Большухин, М.А. Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении / М.А. Большухин [и др.] // Автометрия. – 2014. – № 5. – С. 75–83.

8. Знаменская, И.А. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды / И.А. Знаменская [и др.] // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 13. – С. 51–57.

Acknowledgments

This work was performed as the part of implementation of the basic part of the state task No. 13.8823.2017/8.9.

References

1. Sudakov A.V. [Service life of power equipment at temperature pulsations]. *Nadyozhnost' i bezopasnost'*

ehnergetiki [Reliability and safety of power industry], 2008, vol. 1, no. 2, pp. 10–18 (in Russian).

2. Dahlberg M., Nilsson K.F., Taylor N., Faidy C., Wilke U., Chapuliot S., Kalkhof D., Bretherton I., Church J.M., Solin J., Catalano J. Development of a European proce-dure for assessment of high cycle thermal fatigue in light water reactors. Final Report of the NESC-Thermal Fatigue Project, EUR 22763 EN, ISSN 1018-5593, 2007.

3. Kuschewski M., Kulenovic R., Laurien E. Experimental setup for the investigation of fluid-structure interactions in a T-junction. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, vol. 264, pp. 223–230.

DOI: 10.1016/j.nucengdes.2013.02.024

4. Smith B.L., Mahaffy J.H., Angele K., Westin J. Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction Benchmark exercise, 2011.

5. Zboray R., Prasser H.-M. On the relevance of low side flows for thermal loads in Tjunctions. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, pp. 2881–2888.

DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.05.002

6. Kickhofel J., Valori V., Prasser H.-M. Turbulent pe-netration in T-junction branch lines with leakage flow. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 276, pp. 43–53.

DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.05.002

7. Bolshukhin M.A., Znamenskaya I.A., Sveshnikov D.N., Fomichev V.M. [Thermographic research of turbulent water pulsations at non-isothermal mixing]. *Avtometriya* [Autometry], 2014, no. 5, pp. 75–83 (in Russian).

8. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Novinskaya A.M., Sysoev N.N. [Features of turbulent pulsations spectra of submerged jet water flows]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoj fiziki* [Letters to the journal of technical physics], 2016, vol. 42, no. 13, pp. 51–57 (in Russian).

Модель автоэлектронной эмиссии из торца плоского графена в вакуум

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

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

Поступила 03.01.2019 Принята к печати 28.02.2019

Наноструктуры на основе графеновых лент являются перспективными материалами для использования в качестве эмиттеров электронов.

Цель работы – исследовать автоэлектронную эмиссию электронов из торца одиночной графеновой плоскости.

В квазиклассическом приближении разработана модель автоэлектронной эмиссии из торца прямоугольного графенового листа.

Рассчитана плотность тока автоэлектронной эмиссии в вакуум из торца плоского графенового листа в зависимости от величины напряженности тянущего электрического поля.

Проведен анализ и сравнение предельных токов эмиссии из графена и из объемных систем.

Результаты работы могут быть использованы при разработке автоэлектронных катодов на основе графена.

Ключевые слова: плоский графен, напряженность электрического поля, автоэмиссионный ток

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Н.А. Поклонский	N.A. Poklonski
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by	e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Н.А. Поклонский, А.И. Сягло, С.А. Вырко, С.В. Раткевич, А.Т. Власов.	N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, A.T. Vlassov.
Модель автоэлектронной эмиссии из торца	[Model of Field Electron Emission from the Edge
плоского графена в вакуум.	of Flat Graphene into Vacuum].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 61–68.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 61-68 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68

Model of Field Electron Emission from the Edge of Flat Graphene into Vacuum

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

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

Received 03.01.2019 Accepted for publication 28.02.2019

Abstract

Graphene-based nanostructures are the promising materials for applications as electron emitters.

The aim of the work is to study the field electron emission from the edge of a single graphene plane. In the semi-classical approximation, a model of field electron emission from the edge of a rectangular graphene sheet has been developed.

The current density of field electron emission into vacuum from the edge of a flat graphene sheet was calculated depending on the magnitude of the pulling electric field strength.

The analysis and comparison of limiting emission currents from graphene and from bulk systems have been carried out.

The results of the work can be used in the development of graphene-based field effect cathodes.

Keywords: flat graphene, electric field strength, field emission current.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Н.А. Поклонский	N.A. Poklonski
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by	e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Н.А. Поклонский, А.И. Сягло, С.А. Вырко, С.В. Раткевич, А.Т. Власов.	N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, A.T. Vlassov.
Модель автоэлектронной эмиссии из торца	[Model of Field Electron Emission from the Edge
плоского графена в вакуум.	of Flat Graphene into Vacuum].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 61–68.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 61-68 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-61-68

Введение

Графен и углеродные нанотрубки исследуются теоретически и экспериментально с целью применения в электромеханике, фотонике и спинтронике [1, 2]. В частности, низкоразмерные системы на основе графеновых лент [3] и массивов нанотрубок [4] являются перспективными материалами для эмиссионной электроники [5, 6].

Эффекты эмиссии электронов под действием внешнего электрического поля находят применение в приборах, сочетающих преимущества полупроводниковой планарной технологии и электровакуумных приборов [7]. Электронная эмиссия применяется в сканирующей электронной микроскопии [8], позволяющей получить детализированную информацию о приповерхностной структуре (строении) исследуемых материалов.

Экспериментально исследовалась [9] автоэлектронная эмиссия из торца графена, нанесенного на кварцевую подложку. Изготовлены автоэмиссионные катоды из карбида кремния, покрытого слоем графена [10] и нитевидных кристаллов кремния, покрытых частицами алмаза [11]. В работе [12] сообщается о катодах на основе пленок микрокристаллического углерода, полученных методом плазменного газофазного осаждения. Используя кристаллографические предпосылки для согласования структур с разными периодами кристаллической решетки, в работе [13] на монокристалле алмаза были выращены слои графена, перпендикулярные поверхности (111) алмаза.

Проводятся теоретические исследования полевой эмиссии электронов из тонких пленок с учетом эффектов размерного квантования [14– 16]. Показано, что квантоворазмерные эффекты ведут к немонотонной зависимости глубины проникновения внешнего стационарного электрического поля в пленку от ее толщины. Отмечается, что при некоторых толщинах, являющихся характеристическими для материала пленки, эмиссионный ток из пленочного катода, при прочих равных условиях, будет больше, чем из объемного материала. Однако простые аналитические соотношения для оценки плотности эмиссионного тока электронов из кристаллических пленок толщиной в один атом не представлены.

Цель работы – исследовать автоэлектронную эмиссию электронов из торца графеновой плоскости в конфигурации, показанной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема автоэлектронного эмиттера на основе слоя графена, выращенного перпендикулярно подложке (пояснения см. в тексте)

Figure 1 – Scheme of electron field emitter in the form of graphene layer grown perpendicular to the substrate (for explanations, see the text)

Потенциальная энергия электронов графена во внешнем электрическом поле

Рассматривается эмиссия π -электронов из торца графенового слоя под действием внешнего электрического поля напряженностью F. Рассмотрим прямоугольный лист графена с линейными размерами L_x и L_y , существенно превышающими параметр решетки графена $a = \sqrt{3} a_{\rm CC} =$ = 0,246 нм. Потенциальная энергия W(x) электрона проводимости (рисунок 2a) в пределах графенового листа ($-L_x < x < 0$) равна энергии электрона в K-точке (примем $E_K = 0$) и энергии сродства электрона к вакууму (работа выхода) ЕА за пределами графенового листа ($x < -L_x$ и x > 0). Зависимостью электрических свойств края графена от хиральности («зигзаг» или «кресло») пренебрегаем.

Поместим лист графена во внешнее постоянное электрическое поле F, направленное вдоль координатной оси x.

Полагаем, что потенциальная энергия электрона W(x) слабо меняется внутри слоя графена и спадает за пределами слоя графена со стороны вакуума (рисунок 2*b*), т. е. потенциальная энергия электрона равна EA при $x = -L_x$, резко спадает на величину EA на границе слоя графена ($x = -L_x$), равна нулю внутри слоя графена, резко увеличивается на величину EA на границе слоя графена (x = 0), спадает по закону EA – *eFx* за пределами слоя графена (x > 0). Зависимость потенциальной энергии электрона W(x) от координаты *x* показана на рисунке 2*b*.



Рисунок 2 – Энергетическая структура графенового листа и потенциальная энергия π -электрона W(x)в графеновом листе в отсутствие внешнего электрического поля (*a*) и во внешнем стационарном электрическом поле напряженностью F > 0 (*b*). Состояния *v*-зоны графена, заполненные электронами, заштрихованы

Figure 2 – Energy band structure of the graphene sheet and the potential energy of the π -electron W(x) in the graphene sheet in the absence of an external electric field (*a*) and in an external stationary electric field of strength F > 0(*b*). The states of *v*-band of the graphene filled with electrons are hatched

Формула для потенциальной энергии электрона в слое графена:

$$W(x) = \begin{cases} EA & (x \le -L_x), \\ 0 & (-L_x < x < 0), \\ EA - eFx & (x \ge 0), \end{cases}$$
(1)

где F — напряженность внешнего электрического поля, в котором находится графен. По [12] для автоэлектронной эмиссии из углеродных материалов типичное значение $F \approx 3 \cdot 10^7$ B/см.

Скорость π-электрона в графене

Для расчета тока автоэлектронной эмиссии необходимо знать скорости π -электронов внутри графенового листа. Компоненты скорости электрона в графене выражаются из закона дисперсии в виде [17]:

$$v_{x} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial}{\partial k_{x}} E(k_{x}, k_{y}), \quad v_{y} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial}{\partial k_{y}} E(k_{x}, k_{y}), \quad (2)$$

где k_x и k_y – компоненты квазиволнового вектора π -электрона, $E(k_x, k_y)$ – энергия π -электрона в графене (см. рисунок 3*c*).

На рисунке 3 показаны прямая (а) и обрат-

ная (b) решетки графена. Элементарные векторы трансляций \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 равны по абсолютной величине $a = |\mathbf{a}_1| = |\mathbf{a}_2| = \sqrt{3} a_{\rm CC} = 0,246$ нм и образуют ромбическую элементарную ячейку [1], обозначенную штриховой линией. Первая зона Бриллюэна представляет собой гексагон, стороны которого расположены на расстоянии $2\pi/\sqrt{3}a$ от центра зоны Бриллюэна в точке Г ($k_x = 0, k_y = 0$). Векторы \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 , обратные к векторам \mathbf{a}_1 и \mathbf{a}_2 прямой решетки, равны по абсолютной величине $|\mathbf{k}_1| =$ $= |\mathbf{k}_2| = 4\pi/\sqrt{3}a = 29,5$ нм⁻¹ и образуют ромбическую элементарную ячейку в обратном пространстве, равную по площади первой зоне Бриллюэна.

Закон дисперсии в графене вблизи *К*-точек 1-й зоны Бриллюэна имеет вид [18]:

$$E(k_x, k_y) = \gamma \frac{a\sqrt{3}}{2} \sqrt{(k_x - K_x)^2 + (k_y - K_y)^2}, \quad (3)$$

где $\gamma = 2,8$ эВ – интеграл перекрытия волновых функций двух π -электронов на соседних атомах углерода, K_x и K_y – проекции квазиволнового вектора π -электрона на оси k_x и k_y в *K*-точке.

Из (2) и (3) следует выражение для проекций скорости электрона на оси *x* и *y*:

$$\upsilon_{x(y)} = \frac{\gamma}{\hbar} \frac{a\sqrt{3}}{2} \frac{k_{x(y)} - K_{x(y)}}{\sqrt{(k_x - K_x)^2 + (k_y - K_y)^2}} \,. \tag{4}$$

Модуль скорости электрона вблизи *К*-точки не зависит от его энергии и волнового вектора. Действительно, из (4) находим, что электроны с энергией $E = E(k_x, k_y)$ обладают скоростью, равной по абсолютной величине

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \frac{\gamma}{\hbar} \frac{a\sqrt{3}}{2} \approx 9.10^5 \text{ m/c.}$$
 (5)

Отметим, что вектор скорости *π*-электрона может быть направлен в произвольном направлении в плоскости графена.

Эмиссионный ток электронов из торца графенового листа

Плотность тока автоэлектронной эмиссии вдоль оси *x*, создаваемая π -электронами со скоростью v_x и энергией от *E* до *E* + *dE*, имеет вид

$$dJ_x(E,v_x) = e \frac{g_{2d}(E)}{L_z} v_x D(E) dE,$$
(6)

где $g_{2d}(E)$ – двумерная плотность состояний электронов в графене, $L_z = 0,335$ нм – толщина монослоя графена – расстояние между плоскостя-



Рисунок 3 – Решетка графена в прямом (*a*) и обратном (*b*) пространствах. Штриховой линией отмечена ромбическая элементарная ячейка. Показаны неэквивалентные атомы углерода *A* и *B*, элементарные векторы трансляций в прямом пространстве (**a**₁ и **a**₂) и в пространстве квазиволновых векторов (**k**₁ и **k**₂), $a_{\rm CC} = 0,142$ нм – длина связи между атомами углерода, *K* и *K'* – две неэквивалентные точки на границе зоны Бриллюэна, Γ – центр первой зоны Бриллюэна. Одноэлектронная зонная диаграмма $E(k_x - K_x, k_y - K_y) \equiv E(k_x, k_y) \equiv E$ графена вблизи *K*-точки зоны Бриллюэна (*c*): $E_{\rm F}$ – уровень Ферми, заполненные π -электронами состояния *v*-зоны заштрихованы

Figure 3 – Graphene lattice in direct (*a*) and reciprocal (*b*) spaces. The dashed line indicates the rhombic elementary unit cell. There are shown non-equivalent carbon atoms *A* and *B*, the elementary translation vectors in direct space (\mathbf{a}_1 and \mathbf{a}_2) and in the space of quasi-wave vectors (\mathbf{k}_1 and \mathbf{k}_2), $a_{\rm CC} = 0.142$ nm is the bond length between carbon atoms, *K* and *K'* are two nonequivalent points on the Brillouin zone boundary, Γ is the center of the first Brillouin zone. Single-electron band diagram $E(k_x - K_x, k_y - K_y) \equiv E(k_x, k_y) \equiv E$ of graphene near the *K*-point of the Brillouin zone (*c*): $E_{\rm F}$ is the Fermi level, the states of the *v*-band occupied by π -electrons are hatched

ми графита, D(E) – прозрачность потенциального барьера для электрона на границе с вакуумом, $E = E(k_x, k_y)$ – энергия π -электрона в графене.

Двумерная плотность состояний электронов в графене дается выражением [19]:

$$g_{2d}(E) = \frac{g_{s}g_{v}|E|}{2\pi\hbar^{2}v^{2}} = \frac{8|E|}{3\pi\gamma^{2}a^{2}},$$
(7)

где $g_s = g_v = 2 - факторы, учитывающие вырож$ дение по спину и наличие двух неэквивалентныхдолин в зоне Бриллюэна (в точках*K*и*K'*).

В эмиссионном токе J_x из торца листа графена участвуют электроны со скоростями, направленными вдоль оси *x* (рисунок 1). Для получения полного тока электронов с энергией в интервале (*E*, *E* + *dE*) необходимо сложить проекции скоростей всех электронов на ось *x*, т. е. проинтегрировать (6) по направлениям скоростей электронов:

$$dJ_{x}(E) = e \frac{g_{2d}(E)}{L_{z}} D(E) \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} v \cos \varphi \, d\varphi}{\int_{-\pi}^{\pi} d\varphi} dE =$$
$$= \frac{ev}{\pi L_{z}} g_{2d}(E) D(E) \, dE =$$
$$= \frac{4e}{\sqrt{3}\pi^{2} \gamma \hbar a L_{z}} |E| D(E) \, dE, \tag{8}$$

где интегрирование по φ проводится по углам направления движения электрона $-\pi/2 \le \varphi \le \pi/2$, $\upsilon \cos \varphi$ – проекция скорости электрона на ось *x*. Прозрачность потенциального барьера для электрона *с*-зоны графена в квазиклассическом приближении имеет вид (см., например, [20, 21]):

$$D(E) = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_0^{x_t(E)} \sqrt{2m_e[W(x) - E]} \, dx\right], \qquad (9)$$

где $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона в вакууме, $x_t(E) = (EA - E)/eF$ – координата, при которой $W(x_t) = E, x_t(E_K) = x_0$ (см. рисунок 2*b*).

Подставляя формулу (1) для потенциальной энергии в (9) и вычисляя интеграл, получаем:

$$D(E) = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{0}^{(EA-E)/eF} \sqrt{2m_e(EA-eFx-E)} \, dx\right] = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m_e}(EA-E)^{3/2}}{3\hbar eF}\right).$$
(10)

Плотность туннельного тока получается после интегрирования выражения (8) с учетом (10) по энергии от E = 0 до E = EA с учетом максвелловского распределения электронов по энергии:

$$J_{x} = \frac{4e}{\sqrt{3}\pi^{2}\gamma\hbar aL_{z}} \int_{0}^{\mathrm{EA}} E D(E) \exp\left(-\frac{E}{k_{\mathrm{B}}T}\right) dE, \quad (11)$$

где $k_{\rm B}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Заметим, что формулу (11) можно упростить, полагая энергию электрона в формуле (10) для



Рисунок 4 – Плотность тока автоэлектронной эмиссии J_x из торца монослоя графена, рассчитанная по формуле (11), в зависимости от напряженности приложенного электрического поля *F* при температуре T = 300 K

Figure 4 – Current density of field emission J_x from the edge of the graphene monolayer, calculated by the formula (11), depending on the applied electric field strength *F* at the temperature T = 300 K

прозрачности барьера D(E) равной средней тепловой энергии $E \approx 3k_{\rm B}T/2$. Это дает:

$$J_x \approx \frac{4e(k_{\rm B}T)^2}{\sqrt{3}\pi^2 \gamma \hbar a L_z} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m_e}\left({\rm EA}-1,5k_{\rm B}T\right)^{3/2}}{3\hbar e F}\right).$$

Из этой формулы следует, что плотность тока автоэлектронной эмиссии экспоненциально зависит от обратной величины напряженности электрического поля F и не зависит от площади $L_x L_y$ полоски графена.

Рассчитаем плотность тока эмиссии из чистого листа графена с работой выхода EA = 4,6 эВ [22]. Для температуры T = 300 K, толщины полоски графена $L_z = 0,335$ нм и электрического поля $F = 5 \cdot 10^7$ В/см плотность тока эмиссии J_x по формуле (11) равна 29,3 А/см². Плотность тока эмиссии из торца графена в зависимости от приложенного электрического поля F показана на рисунке 4.

Падение напряжения в слое графена $U_{\rm gr}$ можно оценить по формуле $U_{\rm gr} = RI_x$, где R – сопротивление графена, а $I_x = J_x L_y L_z$ – сила тока автоэлектронной эмиссии в направлении оси x. При напряженности поля F от $3 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^8$ В/м сила автоэмиссионного тока I_x изменяется от 0,15 пА до 0,74 мкА. По оценкам [23] электрическое сопротивление плоского листа графена размерами 10×10 мкм² на постоянном токе равно R = 10 Ом. При таком значении сопротивления величина $U_{\rm gr}$ оказывается очень малой (1,5 пВ $< U_{\rm gr} < 7,4$ мкВ), так что допущение, что падение напряжения на

листе графена много меньше потенциала, соответствующего работе выхода $(U_{\rm gr} \ll {\rm EA}/e)$, оправдано.

Максимальная плотность тока автоэлектронной эмиссии при T = 300 К, рассчитанная по формуле (11) при прозрачности барьера D(E) = 1, равна $J_{x max} = ev k_{\rm B} T g_{2d}(k_{\rm B}T)/\pi L_z = 1,6\cdot 10^7$ A/cm². Отметим, что величина максимально достижимой плотности автоэмиссионного тока из объемных металлов составляет 10^{11} A/cm² [24]. Однако из-за тепловыделения реальные значения плотности тока из объемных материалов имеют величину порядка 10^7 A/cm² [25]. Предельное значение плотности тока 10^{11} A/cm² было достигнуто только в опытах с остриями малых размеров, примерно 1–3 нм (см., например, [24]).

Заключение

В квазиклассическом приближении разработана теоретическая модель автоэлектронной эмиссии из торца прямоугольного графенового листа. Проведен анализ и сравнение предельных токов эмиссии из графена и объемных систем. Показано, что плотность тока автоэлектронной эмиссии из торца графенового листа нелинейно зависит от напряженности внешнего электрического поля.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф18Р-253) и Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция-2020».

Список использованных источников

1. *Poklonski, N.A.* Synergy of physical properties of low-dimensional carbon-based systems for nanoscale device design / N.A. Poklonski [et al.] // Mater. Res. Express. – 2019. – Vol. 6, № 4. – P. 042002 (25 pp.). **DOI:** 10.1088/2053-1591/aafb1c

2. *Ратников, П.В.* Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы / П.В. Ратников, А.П. Силин // УФН. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1249–1287. **DOI:** 10.3367/UFNr.2017.11.038231

3. *Чернозатонский, Л.А.* Новые наноструктуры на основе графена: физико-химические свойства и приложения / Л.А. Чернозатонский, П.Б. Сорокин,

А.А. Артюх // Успехи химии. – 2014. – Т. 83, № 3. – С. 251–279.

4. *Елецкий, А.В.* Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок / А.В. Елецкий // УФН. – 2010. – Т. 180, № 9. – С. 897–930.

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201009a.0897

5. *Гуляев, Ю.В.* Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур / Ю.В. Гуляев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, № 11. – С. 63–70.

6. *Chen, L.* Graphene field emitters: A review of fabrication, characterization and properties / L. Chen, H. Yu, J. Zhong, L. Song, J. Wu, W. Su // Mater. Sci. Eng. B. – 2017. – Vol. 220. – P. 44–58.

DOI: 10.1016/j.mseb.2017.03.007

7. *Han, J.-W.* Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor / J.-W. Han, J.S. Oh, M. Meyyappan // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100, № 21. – P. 213505 (4 pp.). **DOI:** 10.1063/1.4717751

8. *Bell, L.D.* Ballistic electron emission microscopy and spectroscopy: Recent results and related techniques / L.D. Bell // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2016. – Vol. 34, № 4. – P. 040801 (27 pp.). **DOI:** 10.1116/1.4959103

9. *Kleshch, V.I.* Edge field emission of large-area single layer graphene / V.I. Kleshch, D.A. Bandurin, A.S. Orekhov, S.T. Purcell, A.N. Obraztsov // Appl. Surf. Sci. – 2015. – Vol. 357. – P. 1967–1974.

DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.09.160

10. *Конакова, Р.В.* Характеризация автоэмиссионных катодов на основе пленок графена на SiC / Р.В. Конакова [и др.] // ФТП. – 2015. – Т. 49, № 9. – С. 1278–1281.

11. *Гиваргизов, Е.И.* Автоэмиттеры на основе кремниевых острий, покрытых алмазом / Е.И. Гиваргизов // Микроэлектроника. – 1997. – Т. 26, № 2. – С. 102–106.

12. *Рахимов, А.Т.* Автоэмиссионные катоды (холодные эмиттеры) на нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленках (физика, технология, применение) / А.Т. Рахимов // УФН. – 2000. – Т. 170, № 9. – С. 996–999. **DOI:** 10.3367/UFNr.0170.200009f.0996

13. *Lee, J.-K.* The growth of AA graphite on (111) diamond / J.-K. Lee, S.-C. Lee, J.-P. Ahn, S.-C. Kim, J.I.B. Wilson, P. John // J. Chem. Phys. – 2008. – Vol. 129, № 23. – P. 234709 (4 pp.). **DOI:** 10.1063/1.2975333

14. *Majumdar*; *C*. Effect of size quantization on field emission from ultrathin films of degenerate wide-gap semiconductors / C. Majumdar, M.K. Bose, A.B. Maity, A.N. Chakravarti // Phys. Status Solidi B. – 1987. – Vol. 141, № 2. – P. 435–439. **DOI:** 10.1002/pssb.2221410210

15. *Il'chenko*, *L.G.* Electron field emission (FE) from quantum size systems / L.G. Il'chenko, Yu.V. Kryuchenko,

V.G. Litovchenko // Appl. Surf. Sci. – 1995. – Vol. 87/88. – P. 53–60. **DOI:** 10.1016/0169-4332(94)00531-1

16. *Poklonski, N.A.* Field emission from 2D layer / N.A. Poklonski, S.L. Podenok, S.A. Vyrko // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2005, Minsk, 24–27 May 2005 / Ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. – Singapore : World Scientific, 2005. – P. 144–147. **DOI:** 10.1142/9789812701947_0029

17. *Ландау, Л.Д.* Курс теоретической физики: в 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – Т. 3 : Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М. : Физматлит, 2004. – 800 с.

18. *Castro Neto, A.H.* The electronic properties of graphene / A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim // Rev. Mod. Phys. -2009. - Vol. 81, N 1. - P. 109–162.

DOI: 10.1103/RevModPhys.81.109

19. *Fang, T.* Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons / T. Fang, A. Konar, H. Xing, D. Jena // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 91, № 9. – P. 092109 (3 pp.). **DOI:** 10.1063/1.2776887

20. *Толмачев, В.В.* Квазиклассическое приближение в квантовой механике / В.В. Толмачев. – М. : МГУ, 1980. – 187 с.

21. *Никитин, Е.Е.* Мнимое время и метод Ландау вычисления квазиклассических матричных элементов / Е.Е. Никитин, Л.П. Питаевский // УФН. – 1993. – Т. 163, № 9. – С. 101–103.

DOI: 10.3367/UFNr.0163.199309e.0101

22. Song, S.M. Determination of work function of graphene under a metal electrode and its role in contact resistance / S.M. Song, J.K. Park, O.J. Sul, B.J. Cho // Nano Lett. – 2012. – Vol. 12, № 8. – P. 3887–3892.

DOI: 10.1021/nl300266p

23. *Елецкий, А.В.* Графен: методы получения и теплофизические свойства / А.В. Елецкий, И.М. Искандарова, А.А. Книжник, Д.Н. Красиков // УФН. – 2011. – Т. 181, № 3. – С. 233–268.

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103a.0233

24. *Fursey*, *G*. Field emission in vacuum microelectronics / G. Fursey. – New York : Kluwer, 2005. – xv+205 p.

25. *Модинос, А.* Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия / А. Модинос. – М.: Наука, 1990. – 320 с.

Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. F18R-253) and Belarusian National Research Program "Convergence-2020".

References

1. Poklonski N.A., Vyrko S.A., Siahlo A.I., Poklonskaya O.N., Ratkevich S.V., Hieu N.N., Kocherzhenko A.A. Synergy of physical properties of low-dimensional carbon-based systems for nanoscale device design. *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 042002 (25 pp.). **DOI:** 10.1088/2053-1591/aafb1c

2. Ratnikov P.V., Silin A.P. Two-dimensional graphene electronics: current status and prospects. *Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1139–1174.

DOI: 10.3367/UFNe.2017.11.038231

3. Chernozatonskii L.A., Sorokin P.B., Artukh A.A. Novel graphene-based nanostructures: physicochemical properties and applications. Russ. Chem. Rev., 2014, vol. 83, no. 3, pp. 251–279.

DOI: 10.1070/RC2014v083n03ABEH004367

4. Eletskii A.V. Carbon nanotube-based electron field emitters. *Phys. Usp.*, 2010, vol. 53, no. 9, pp. 863–892. **DOI:** 10.3367/UFNe.0180.201009a.0897

5. Gulyaev Yu.V., Aban'shin N.P., Gorfinkel' B.I., Morev S.P., Rezchikov A.F., Sinitsyn N.I., Yakunin A.N. New solutions for designing promising devices based on low-voltage field emission from carbon nanostructures. *Tech. Phys. Lett.*, 2013, vol. 39, no. 6, pp. 525–528.

DOI: 10.1134/S1063785013060035

6. Chen L., Yu H., Zhong J., Song L., Wu J., Su W. Graphene field emitters: A review of fabrication, characterization and properties. *Mater. Sci. Eng. B*, 2017, vol. 220, pp. 44–58. **DOI:** 10.1016/j.mseb.2017.03.007

7. Han J.-W., Oh J.S., Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, no. 21, pp. 213505 (4 pp.).

DOI: 10.1063/1.4717751

8. Bell L.D. Ballistic electron emission microscopy and spectroscopy: Recent results and related techniques. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 2016, vol. 34, no. 4, pp. 040801 (27 pp.). **DOI:** 10.1116/1.4959103

9. Kleshch V.I., Bandurin D.A., Orekhov A.S., Purcell S.T., Obraztsov A.N. Edge field emission of large-area single layer graphene. *Appl. Surf. Sci.*, 2015, vol. 357, pp. 1967–1974. **DOI:** 10.1016/j.apsusc.2015.09.160

10. Konakova R.V., Okhrimenko O.B., Svetlichnyi A.M., Ageev O.A., Volkov E.Yu., Kolomiytsev A.S., Jityaev I.L., Spiridonov O.B. Characterization of fieldemission cathodes based on graphene films on SiC. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 9, pp. 1242–1245.

DOI: 10.1134/S1063782615090146

11. Givargizov E.I. Diamond-coated silicon tips as field emitters. *Russian Microelectronics*, 1997, vol. 26, no. 2, pp. 82–86.

12. Rakhimov A.T. Autoemission cathodes (cold emitters) on nanocrystalline carbon and nanodiamond

films: physics, technology, applications. *Phys. Usp.*, 2000, vol. 43, no. 9, pp. 926–929.

DOI: 10.1070/PU2000v043n09ABEH000808

13. Lee J.-K., Lee S.-C., Ahn J.-P., Kim S.-C., Wilson J.I.B., John P. The growth of AA graphite on (111) diamond. *J. Chem. Phys.*, 2008, vol. 129, no. 23, pp. 234709 (4 pp.). **DOI:** 10.1063/1.2975333

14. Majumdar C., Bose M.K., Maity A.B., Chakravarti A.N. Effect of size quantization on field emission from ultrathin films of degenerate wide-gap semiconductors. *Phys. Status Solidi B.*, 1987, vol. 141, no. 2, pp. 435–439. **DOI:** 10.1002/pssb.2221410210

15. Il'chenko L.G., Kryuchenko Yu.V., Litovchenko V.G. Electron field emission (FE) from quantum size systems. *Appl. Surf. Sci.*, 1995, vol. 87/88, pp. 53–60.

DOI: 10.1016/0169-4332(94)00531-1

16. Poklonski N.A., Podenok S.L., Vyrko S.A. Field emission from 2D layer. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2005*, Minsk, 24–27 May, 2005, ed. V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. Singapore, World Scientific, 2005, pp. 144–147.

DOI: 10.1142/9789812701947_0029

17. Landau L.D., Lifshitz L.M. Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory. Oxford, Pergamon Press, 1989, 687 p.

18. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, vol. 81, № 1, pp. 109–162. **DOI:** 10.1103/RevModPhys.81.109

19. Fang T., Konar A., Xing H., Jena D. Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 9, pp. 092109 (3 pp.). **DOI:** 10.1063/1.2776887

20. Tolmachev V.V. [Semi-classical approximation in quantum mechanics]. Moscow, MSU Publ., 1980, 187 p. (in Russian).

21. Nikitin E.E., Pitaevskii L.P. Imaginary time and the Landau method of calculating quasiclassical matrix elements. *Phys. Usp.*, 1993, vol. 36, no. 9, pp. 851–853. **DOI:** 10.1070/PU1993v036n09ABEH002310

22. Song S.M., Park J.K., Sul O.J., Cho B.J. Determination of work function of graphene under a metal electrode and its role in contact resistance. *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 3887–3892. **DOI:** 10.1021/nl300266p

23. Eletskii A.V., Iskandarova I.M., Knizhnik A.A., Krasikov D.N. Graphene: fabrication methods and thermophysical properties. *Phys. Usp.*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 227–258. **DOI:** 10.3367/UFNe.0181.201103a.0233

24. Fursey G. Field Emission in Vacuum Microelectronics, New York, Kluwer, 2005, xv+205 p.

25. Modinos A. Field, Thermionic, and Secondary Electron Emission Spectroscopy. New York, Springer, 1984, xii+375 p. **DOI:** 10.1007/978-1-4757-1448-7

УДК 620.179.16+54.1

Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой

А.Р. Баев¹, А.Л. Майоров¹, Н.В. Левкович², М.В. Асадчая¹

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь ²Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 04.01.2019 Принята к печати 28.02.2019

Распространение импульсного сигнала поверхностной волны по объекту с неоднородным поверхностным слоем, полученным, например, в результате поверхностного упрочнения, структурной поврежденностью, сопровождается дисперсией скорости волны, несущей важную информацию о параметрах такого слоя. Цель работы заключалась в изучении взаимосвязи между акустическими параметрами импульсного акустического сигнала поверхностной и подповерхностной волн и поверхностного слоя стальных образцов, упрочненных закалкой токами высокой частоты (ТВЧ), и серого чугуна, упрочненного отбелом.

Проведен краткий анализ известных работ по определению глубины упрочненных поверхностных слоев различными методами, включая ТВЧ закалку, цементацию и др. На основе интегрального выражения Оулдера. выполнен расчет зависимости, связывающей скорость волны, ее частоту, глубину упрочненного слоя и пространственное распределения твердости, представляемой в виде ступеньки с изменяющимся наклоном ее боковой поверхности, моделирующей переходную зону упрочненного слоя.

Импульсным методом с использованием малоапертурных преобразователей частотой 1–3,8 МГц получены зависимости скорости поверхностной волны от высоты среза упрочненного ТВЧ закалкой слоя. Проведенное сравнение данных эксперимента и расчетов теоретической модели показало хорошее качественное соответствие между ними, высокую «чувствительность» метода по отношению к характеру изменения твердости по глубине упрочненного слоя. Показана перспективность предложенного подхода для решения обратной задачи восстановления пространственного распределения твердости на основе данных эксперимента.

На стальных образцах и образцах серого чугуна апробирован метод гониометра для определения глубины упрочненного слоя по данным угла, соответствующего минимуму амплитуды отраженной волны или максимуму амплитуды возбуждаемой в образце поверхностной моды. Показано, что с увеличением толщины упрочненного ТВЧ закалкой слоя этот угол уменьшается на 24–26', а глубина отбеленного чугуна на $\approx 6^{\circ}$. Даны рекомендации по использованию результатов исследований на практике.

Ключевые слова: поверхностные волны, упрочненный слой металла.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.Р. Баев	A.R. Baev
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	of Belarus,
e-mail: baev@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
	e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая.	A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya.
Особенности распространения поверхностных	[Features of the Surface and Subsurface Waves Application
и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой.	for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.
Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой.	Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 69–79.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 69–79 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer

A.R. Baev¹, A.L. Mayorov¹, N.V. Levkovich², M.V. Asadchaya¹

¹Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus ²Belarusian State University, Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 04.01.2019 Accepted for publication 28.02.2019

Abstract

The propagation of a pulsed signal of a surface wave over an object with a non-uniform surface layer, obtained, for example, as a result of surface hardening, with structural damage, is accompanied by the dispersion of the velocity of the wave carrying important information about the parameters of such a layer. The aim of the work is to study the relationship between the acoustic parameters of a pulsed acoustic signal of a surface and subsurface waves and the surface layer of steel specimens hardened by high-frequency hardening, and gray iron-chill. Features of the surface and subsurface waves application for ultrasonic evaluation of physicomechanical properties of solids. Strenghtned inhomogeneous surface layer.

A brief analysis of the known works on determining the depth of hardened surface layers by various methods, including high-frequency hardening, cementation, etc., is carried out. Based on the Oulder integral expression. The dependence connecting the wave velocity, its frequency, the depth of the hardened layer and the spatial distribution of hardness represented as a step with a changing slope of its side surface simulating the transition zone of the hardened layer are calculated.

Using the pulse method and low-aperture transducers with a frequency of 1-3.8 MHz, the dependences of the surface wave velocity on the cutting height of a layer hardened by HDTV hardening are obtained. A comparison of experimental data and calculations of the theoretical model showed a good qualitative correspondence between them, demonstrate a high «sensitivity» of the method in relation to the nature of the change in hardness over the depth of the hardened layer. It is shown that the proposed approach is promising for solving the inverse problem of restoring the spatial distribution of hardness based on experimental data.

The goniometric method was approbated to determine the dependence between amplitude-angle characteristics and depth of the surface steel layers hardened by high-frequency hardening and depth of hardened gray iron specimens layer – with chill. It is shown that the optimal angle corresponding maximum of excited surface wave amplitude in steel specimens is decreasing up to 24-26' vs. hardened depth layer. But when the tested specimens from cast iron this angle decreasing is nearly of 6° . Recommendations on the use of research results in practice are given.

Keywords: surface waves, hardened metal layer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.Р. Баев	A.R. Baev
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	of Belarus,
e-mail: baev@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
	e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, М.В. Асадчая.	A.R. Baev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, M.V. Asadchaya.
Особенности распространения поверхностных	[Features of the Surface and Subsurface Waves Application
и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой.	for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids.
Ч. 2. Упрочненный неоднородный поверхностный слой.	Part 2. Strenghtned Inhomogeneous Surface Layer].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 69–79.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 69–79 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-69-79

Введение

Применение поверхностных и подповерхностных волн в твердых телах перспективно как для обнаружения дефектов на поверхности или в подповерхностной зоне, так и для оценки физико-механических свойств поверхности, включая механические напряжения о_{іі}, прочность σ_{пр}, твердость *B*, степень поврежденности металла и др. Определение качества упрочнения поверхности металлов термической, химикотермической, лазерной, механической обработкой и др. является насущной научно-технической задачей различных отраслей современного производства. Причем в качестве важнейшего параметра, характеризующего технологию упрочнения, выступает глубина упрочненного поверхностного (УП) слоя Н, служащего в качестве своеобразной «кожи», существенно повышающей прочность и износостойкость функционирующего объекта.

Кроме того, представляет значительный интерес информация не только об *H*, но и о распределении по глубине УП слоя z таких важных параметров, как твердость В и бальность зерна металла b. В процессе упрочнения возможны некоторые вариации технологического процесса, обусловленные состоянием металла, геометрией металлоизделия, плотностью и локальностью воздействующего на его поверхность потока энергии и др. При этом, в зависимости от тепловых и диффузионных процессов, происходящих в поверхностном слое, характер распределения твердости $B_{r}(z)$ и бальности зерна металла b(z)по высоте может изменяться. Так что, ориентируясь при принятии решения только на величину измеряемой твердости поверхности изделия, можно получить некорректную оценку глубины упрочненного слоя Н.

В настоящее время наиболее надежным методом оценки глубины УП слоя является разрушающий, заключающийся в анализе характера изменения зависимостей B(z) и b(z). Однако, вследствие трудоемкости, материальных и временных потерь, такому контролю подвергается выборочно незначительное количество изделий из изготавливаемой партии. В особенности, возникают трудности при контроле дорогостоящих изделий, имеющих сложный профиль. Однако, несмотря на объективность оценки контролируемых параметров разрушающим методом, существует вероятность пропуска изделий

с браком P(n), возрастающая с уменьшением nи зависящая также от ряда производственных факторов.

Для решения этой важной для промышленности проблемы в мире предлагается использовать различные методы неразрушающего контроля по данным магнитных характеристик, электропроводности, шумов Баркгаузена и др. [1, 2], а также по данным акустических параметров [2-12]. Методы, основанные на анализе сигнала-отклика после воздействие квазистатического или переменного магнитного поля имеют ограничения. Причина кроется в том, что небольшие отклонения рецептуры (в пределах технических условий, технологии производства металла, а также сложная геометрия и состояние поверхности объекта оказывают существенное влияние на надежность контроля и существенно ограничивают применение этих методов.

Как показывает анализ известных разработок в рассматриваемом направлении, совершенствование и использование именно акустических методов для неразрушающего контроля широкого спектра упрочняющих технологий является одним из наиболее перспективных направлений по созданию информативного и надежного метода оценки глубины УП слоя при достаточной простоте реализации его. Прежде всего, это обусловлено наличием непосредственной связи между физико-механическими параметрами $\Xi_i \subset \{E, \rho, B, l_b, ...\}$ и скоростями продольной (L), поперечной (T) и поверхностной (R) упругих мод:

$$C_{L,R,T} = (E/\rho)^{0.5} F_{L,R,T}(\kappa),$$
(1)

где *E* и ρ – модуль Юнга и плотность металла; κ – коэффициент Пуассона. (Формула корректна для однородной среды).

Как показывает проведенный предварительно анализ известных исследований, включая, например [3–7], в качестве наиболее информативной моды, характеризующей параметры УП слоя, может служить поверхностная акустическая волна (ПАВ), ее базовый параметр – скорость волны C_R . Выбор именно ее обусловлен тем, что с изменением частоты f изменяется длина волны и глубина ее локализации пропорционально λ_R . Причем, как следует из (1), величина $\lambda_R \sim C_R \sim (E/\rho)^{0.5}$. Т. е. этот акустический параметр должен наилучшим образом коррелировать с параметрами поверхностного слоя.
Отметим, что поверхность металла может быть упрочнена различными способами, указанными выше для стальных изделий. Упрочнение же чугунов поверхностным отбелом может быть осуществлено направленно (например, для прокатных валков) или как результат брака. И в том, и в другом случае требуется определять качество упрочнения, где наиболее чувствительным параметром к изменению глубины отбела является ПАВ. Цель работы заключалась в изучении взаимосвязи между акустическими параметрами импульсного акустического сигнала ПАВ и упрочненного поверхностного слоя образцов стали и чугуна.

Анализ методов и особенностей возбуждения и распространения поверхностных акустических волн в объектах с упрочненным поверхностным слоем

Согласно известным данным, как правило, при упрочнении поверхности термическим, химико-термическим методом, ТВЧ, механической обработкой, лазерным воздействием и др. величина скорости ультразвуковых волн уменьшается с увеличением твердости металла на 1–2 % и более, что зависит от зондирующей моды, а также свойств металла. При этом и модуль Юнга, и плотность металла также уменьшаются, но в разной степени, что и обуславливает наличие не-

равенства
$$\frac{\partial C_{L,R,T}}{\partial B} < 0.$$

Исходя из анализа указанной взаимосвязи параметров УП слоя с акустическими свойствами, можно условно выделить 4 группы методов оценки глубины УП слоя. Причем, 1-я группа методов основана на прямом измерении скорости упругой моды, коррелирующей с глубиной УП слоя, – по данным времени $\Delta t = t_2 - t_1$ прохождения сигнала акустической базы L₀: $C_{L,R,T} = \frac{L_0}{\Delta t}$ [3-6]. В случае, когда волна поверхностная, то ее проникновение в глубь меопределяется длиной волны λ_R, талла а скорость ПАВ будет зависеть от отношения $h_{\lambda} = h/\lambda_{R} \sim h(\rho/E)^{-0.5} f$. Т. е. можно считать, что возбуждаемый поток энергии ПАВ в твердом теле в двумерном пространстве представляет собой функцию $\Pi = \Pi(E^*, \rho^*, \kappa^*)$, где $E^*, \rho^*, \kappa^* - \text{не-}$ которые усредненные в диапазоне $z = 0 - \infty$ параметры, существенно зависящие от безразмерной толщины упрочненного слоя H_{λ} . При этом: $H_{\lambda} \to \infty$, то $\Pi \to \Pi_0, C_R \to C_{R0};$

$$H_{\lambda} \to 0$$
, to $\Pi \to \infty$, $C_R \to C_{R\infty}$,

где индекс ∞ характеризует соответствующие параметры для случая распространения волны в «сырой» основе металла (без закалки), а индекс 0 – в материале с постоянной твердостью B_0 .

В работах [3-5] для определения глубины УП слоя используется импульсно-фазовый теневой метод измерения скорости ПАВ на специально подобранной частоте f^* в предположении сохранения подобия профиля твердости по глубине слоя B(z). При нарушении же режима поверхностного упрочнения металла как глубина УП слоя, так и форма профиля твердости могут измениться. Для решения подобной задачи при определении глубины нитроцементированного слоя предлагается объект прозвучивать на разных частотах, что (по мнению авторов) позволит с помощью зависимости $C_{p}(f)$ оценивать более точно величину Н по сравнению с методами, реализующими одночастотный принцип измерений [7]. Как показывает анализ акустического тракта, возможности этого метода ограничены. Использование этого метода возможно на объектах с плоской поверхностью и высокой чистотой обработки. Кроме того, не учитывается влияние качества контакта на спектр ПАВ и время прохождения последней при варьировании частоты импульса, вызванное, например, смещением точки выхода акустического луча из призмы преобразователя и сдвигом фазы при прохождении контактного слоя.

Для качественной оценки глубины УП слоя могут быть использованы и косвенные, амплитудно-угловые методы (2-я группа), которые, как правило, предназначены для определения скорости поверхностных или подповерхностных волн в материалах с однородной структурой [3, 11]. В этом случае определяют оптимальный угол падения β_m продольной моды на объект, при котором достигается максимум амплитуды возбуждаемой подповерхностной или поверхностной волны, а затем, исходя из закона Снеллиуса, определяют скорость той или иной моды

$$C_{LTR} = C_1 \left(\sin\beta_m \right)^{-1} . \tag{2}$$

Погрешность же измерений зависит от точности установки угла падения волны на объект, апертуры преобразователей, качества поверхности и др.

Отметим, что несмотря на простоту, применение амплитудно-угловых методов в режиме *On-Line* проблематично и ограничено, хотя, как будет показано ниже на примере использования гониометрического метода, для толщины отбела на сером чугуне это оправдано.

К 3-й группе методов оценки глубины УП слоя следует отнести те, что основаны на эффектах рефракции акустических лучей поля поперечных волн в неоднородном слое, возбуждаемых при падении упругой волны на объект под вторым критическим углом. Для реализации одной из разновидностей этого метода в работе [10] предложена теоретическая модель и методика определения глубины упрочненного слоя по данным измерения координат $x_{\max,i}$ максимумов амплитуды интерферирующих волн А_i, локализованных в окрестности контактной поверхности объекта и рефрагирующих в объеме отбеленного слоя прокатного валка. Использование такого метода возможно лишь при условии, когда $H_1 >> 1$, что существенно сужает возможности применения этого метода.

В последнее время появился ряд работ, посвященных определению глубины УП слоя путем статистической обработки рассеянных поперечных волн от граничной области между УП слоем (мартенситом) и феррит перлитной структурой [10, 11] – 4-я группа методов оценки глубины УП слоя. При этом глубина упрочненного слоя оценивается в режиме «эхо» - по времени прохождения высокочастотного импульса от поверхности УПС и обратно, а характерный путь S оценивается по данным статистической обработки сигнала, исходя из выражения $S^* \approx C_{R}\Delta \tilde{t}_{R} = 2kH^*$, где H^* – искомое значение глубины упрочненного слоя; C_R – усредненное значение скорости в слое металла; k - корреляционный коэффициент. Причем в работе [11] сообщается о возможности решения таким способом весьма важной задачи - восстановления профиля изменяющихся свойств УП слоя. Несмотря на кажущуюся простоту, применение такого метода на практике возможно лишь при измерении УП слоя глубиной 1,5-2 мм и более. Очевидно, что такой метод является весьма специфическим и не может найти широкого использование из-за трудности получения статистических корреляционных параметров с достаточной точностью в силу влияния даже незначительных изменений химического состава, особенностей

технологического процесса (в пределах технических условий) на структуру переходного слоя и расположения зерен по размерам по глубине. В настоящее же время наиболее востребованы именно технологии упрочнения металлоизделий на глубину до 2–2,5 мм.

Предварительный анализ рассмотренных выше методов измерений глубины УП слоев по данным скорости ПАВ, а также свойств объекта исследования в настоящей работе показывает, что наиболее предпочтительным для установления связи между параметрами ТВЧ упрочненного слоя и скоростью ПАВ является импульснофазовый метод. При этом представляет интерес, прежде всего, рассмотреть возможность определения не только глубины УП слоя, но и профиля твердости.

О влиянии профиля твердости на скорость поверхностных акустических волн

Как указывалось выше, распространение ПАВ по объекту с неоднородным УП слоем сопровождается изменением скорости и длины волны в силу того, что эффективные значения модуля Юнга E^* и плотности среды ρ^* также изменяются в зависимости от глубины локализации. Так как $\xi \Delta < 1$, то из формулы (1) можно оценить изменение скорости согласно формуле $C_R \sim (E^*/\rho^*)^{0.5}$. Необходимо также отметить, что согласно результатам экспериментальных исследований [10], связь твердости материала, измеренной в окрестности некоторой координате *z*, где локальная скорость C_{RP} , предлагается аппроксимировать линейной зависимостью в переходной зоне z = 0 - H. Так что:

$$\Delta C_{R} = C_{R\infty} - C_{RP} = \eta [(B(z) - B_{\infty})] \approx C_{R,z=H} - C_{RP} = \eta [(B(z) - B_{z=H})], \qquad (3)$$

где $C_{R\infty}$ и $B = B_{\infty} = B_{z=H}$ – скорость и твердость в основе металла соответственно; C_{RP} – локальная скорость ПАВ на поверхности среза металла в плоскости *z*, измеренная в отсутствие дисперсии при $f \rightarrow \infty$; $\eta = \frac{C_{R\infty} - C_{R0}}{B_{\infty} - B_{0}}$ – экспериментально установленная постоянная для данного технологического процесса упрочнения.

Ввиду того, что в рассматриваемом случае $\{\Delta E/E, \Delta \rho/\rho\} \ll 1$, то скорость волны, распространяющейся по поверхности объект C_{R0} , может быть оценена из формулы Оулдера [12]:

$$C_{R} = \Delta C_{R}^{*} (C_{R0})^{-1} =$$

= $\Omega \int_{-\infty}^{0} (-\Delta w^{2} \Delta \rho u_{i}^{*} u_{i} + u_{i,j}^{*} u_{k,l} \Delta P_{ijkl}) F(z) dz,$ (4)

где $\Delta C_R^* = C_R(z) - C_{R0}$, а индекс 0 соответствует координате поверхности объекта z = 0; u_i и u_i^* – скорости смещений невозмущенной и возмущенной волны соответственно; w – абсолютное значение средней за период энергии невозмущенной волны, переносимой через упругое полупространство единичной ширины; ΔP_{ijkl} – изменения упругих модулей, причем { $\Delta \rho, \Delta P_{ijkl}$ } ~ F(z).

Некоторые результаты численного анализа изменения скорости ПАВ от глубины УП слоя и профиля твердости на разных частотах иллюстрируются рисунками 1 и 2a. Причем в первом случае моделируемый профиль твердости B(z) подобен ступеньке с варьируемым углом наклона ее боковой поверхности $\phi = \operatorname{tg} \frac{d}{H}$, где d – длина переходной зоны, характеризующей изменение твердости по глубине слоя. Для характеристики переходной зоны по оси ординат используется параметр $p = (C_{RP}(z) - C_{RP0})/C_{RP0}$, где $C_{RP0} = C_{RP}$ при z = 0.

Представленная же на рисунке 2а кривая 4, описывающая профиль твердости и имеющая максимум в окрестности координаты z*>z, характерна для данного технологического процесса ТВЧ закалки.

Ход зависимости скорости ПАВ в случае, когда максимум твердости расположен в подповерхностной зоне в окрестности координаты $z \rightarrow z^* > 0$, где «локальная» скорость волны $C_{_{RP}}$ принимает минимальное значение, иллюстрируется рисунком 2, где для сравнения представлены экспериментальные данные.



Рисунок 1 – Влияния формы профиля упрочненного слоя в виде ступеньки (*a*) на изменение скорости поверхностной акустической волны (*b*, *c*) в образцах с разной глубиной среза *h*; *b*: максимальная глубина упрочненного слоя H = 1 мм, $\theta = 0$ – при различной степени его упрочнения, $\Delta C_R/C_{R0}$, % = 0 (1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 (4); 2 (5); 2,5 (6); 3 (7); *c*: *h*, мм = 0 (1); 0,5 (2); 1 (3, 4, 5); 2 (6); 3 (7); $\theta = 0$ (1, 2, 3, 5, 7); $\theta = \pi/4$ (4); $\pi/6$ (5)

Figure 1 – Effects of the shape of the profile of the hardened layer in the form of a step (*a*) on the change in the velocity of the surface acoustic wave (*b*, *c*) in samples with different cut-off depth *h*; *b*: maximum depth of the hardened layer $H = 1 \text{ mm}, \theta = 0$ – at various degrees of its hardening, $\Delta C_R / C_{R0}, \% = 0$ (1); 0,5 (2); 1 (3); 1,5 (4); 2 (5); 2,5 (6); 3 (7); *c*: *h*, mm = 0 (1); 0,5 (2); 1 (3, 4, 5); 2 (6); 3 (7); $\theta = 0$ (1, 2, 3, 5, 7); $\theta = \pi/4$ (4); $\pi/6$ (5)

Как показывают численные расчеты, при моделировании профиля твердости или $C_{RP}(z)$ в виде ступеньки с изменяющейся величиной переходной зоны *d* зависимости $C_R(f)$ – монотонно убывающие функции, выходящие на насыщение независимо от соотношения d/H. Причем только в случае, когда $f \to \infty$ (или $H_{\lambda} = H/\lambda_R >> 1$) $C_{RP} \to C_{R0}$, где $B \to B_{z=0}$. Таким образом, используя формулы (2) и (3), а также определяя значение C_{R0} , представляется возможным оценить твердость на поверхности объекта согласно формуле: $B_{z=0} = B_0 = (C_{R\infty} - C_{R0})/\eta + B_{\infty}$, не прибегая к механическим испытаниям, что в ряде случаев весьма затруднительно или невозможно.

Как видно, увеличение глубины УП слоя, степени закалки, а также уменьшение переходной зоны d сопровождается более быстрым спадом кривых $C_R(f)$ и выходом их на насыщение. Кроме того, уменьшается и частотная область Δf квазилинейного изменения скорости ПАВ. Необходимо отметить, что если в процессе упрочнения сохраняется подобие профиля

твердости, определяемого преимущественно отношением d/H, а также известна зависимость $C_{RP}(z)$, то представляется возможным оценить толщину УП слоя по данным измеренной скорости волны на одной специально подобранной частоте. Для повышения же точности измерений необходим выбор такой рабочей частоты, при которой длина волны сопоставима с глубиной УП слоя. Причем, как следует из численных расчетов, наиболее высокая надежность измерений достигается при соблюдении условия: $1/6 < h < 2\lambda/3$.

С другой стороны, при сохранении подобия моделируемого профиля твердости и монотонно убывающем характере $C_{RP}(f)$ представляется возможным оценить параметры УП слоя, включая его глубину и ширину переходной зоны, измеряя скорость ПАВ на нескольких специально подобранных частотах f_i . Отметим, что если УП слой имеет скорость упругих мод больше, чем основа, то следует ожидать обратного – рост C_R с увеличением H.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Методические особенности экспериментальных измерений

Для сравнения расчетных и опытных данпроведены экспериментальные были ных исследования скорости ПАВ импульсно-фазовым методом на стальном образце с упрочненным ТВЧ закалкой слоем. Путем последовательного среза верхнего слоя на глубину формировался образец ступенчатой формы. Длина каждой ступеньки, определяющей акустическую базу прозвучивания, составляла 46 мм. Измерение скорости ПАВ производились путем установки измерительных малоапертурных преобразователей на поверхность ступеньки образца, расположенной на расстоянии $z = h_i$ от поверхности с нулевым срезом z = 0.

Исследуемый частотный диапазон f = 1-3,8 МГц. Измерения скорости ПАВ проводились теневым методом и с постоянной акустической базой L = 40 мм. Для повышения точности относительных измерений до 0,1–0,15 % использованы разработанные в Институте прикладной физики НАН Беларуси малоапертурные преобразователи с рабочей контактной поверхностью, поперечный размер которой составляет $\Delta l = 200-300$ мкм. шириной рабочей поверхности преобразователей 0,2–0,3 мм.

Измерение временных интервалов производилось с помощью измерителя временных интервалов И1-8 с временной шкалой до 1 нс. С одного из выходов прибора опорный сигнал запускает генератор электрических импульсов возбуждения ПАВ. С другого же выхода прибора сигнал подается для запуска развертки осциллографа, служащего в качестве индикатора. На вход осциллографа подаются импульсы с приемников колебаний, что позволяет с помощью электронной задержки И1-8 определять временной интервал прохождения $\Delta t = t_2^{} - t_1^{}$ волной фиксированного расстояния и определять искомую скорость по формуле: $C_{R} = L(t_{2} - t_{1} + \Delta t^{*})^{-1}$, где Δt^{*} – временная поправка. Она обусловлена влиянием переходных слоев и особенностями возбуждения и приема ПАВ при условии, когда ширина волноводов преобразователей в окрестности контактной поверхности объекта $\Delta l < 0.5\lambda_{R}$. Эта поправка нивелируется за счет дополнительного измерения ПАВ на незакаленном стальном образце той же марки с известной скоростью ПАВ.

В качестве генератора и усилителя недетектированных электрических импульсов использованы блоки прибора УД2-12. Объектом исследований глубины УП слоя импульсно-фазовым методом служили стальные образцы с разной глубиной среза, а также образец без закалки («сырой»). Временная погрешность измерений, обусловленная нестабильностью установки преобразователей на объект и аппаратурной погрешностью, не превышала приблизительно 5 нс при максимальном изменении измеряемого временного интервала до $\Delta t \approx 300$ нс.

Данные сравнения эксперимента и расчетов

На рисунке 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости изменения скорости ПАВ и твердости от глубины среза, выполненного на стальных образцах (Ст45) с ТВЧ закалкой. Как видно из представленных данных, наблюдается неплохое качественное соответствие между расчетными и опытными данными. Причем тенденция хода зависимости ΔC_R от *h* показывает, что с увеличением частоты волны дифференциальный параметр $c^* = \frac{\partial C_R}{\partial h} > 0$ в окрестности $\Delta h_c \to 0$ уменьшается. При характерном же значении $f \to f^*$ и $c^* \to 0$, $\frac{\partial^2 C_R}{\partial^2 h} > 0$ наблюдается минимум функции $c^*(z)$. Уменьшение же частоты волны приводит к нивелированию этого эффекта. Таким образом, изменяя частоту или длину поверхностной акустической волны, представляется возможным «чувствовать» изменения по глубине упругих свойств УП слоя. Т. е. частотная зависимость скорости ПАВ представляет собой наиболее надежный источник информации о качестве упрочнения металла, а также позволяет устранить неоднозначность измерений. Отметим, что если измерения проводятся на специально подобранной частоте, то надежные измерения достигаются лишь при сохранении подобия профиля B(z), а выбранная длина волны зондирующего сигнала $\lambda_R = \lambda_R^* > H$, где H – требуемая глубина упрочнения.



Рисунок 2 – Сравнение данных теоретического моделирования (*a*) и эксперимента (*b*) – зависимости изменения скорости поверхностной акустической волны $\Delta C_R/C_{R0}$ (1–3) и твердости *B* (4) от толщины среза поверхностного слоя металла *h*, упрочненного ТВЧ закалкой; *f*, МГц = 1 (1); 1,8 (2); 3,8 (3)

Figure 2 – Comparing the data of theoretical modeling (*a*) and experiment (*b*) – dependence of the speed of the surface acoustic wave $\Delta C_R/C_{R0}$ (1–3) and hardness *B* (4) vs. the cut thickness of the surface metal layer *h*, strengthened by high-frequency hardening; *f*, MHz = 1 (1); 1.8 (2); 3.8 (3)

Необходимо отметить, что имеющееся различие между экспериментальными и расчетными данными обусловлено некоторым упрощением расчетной модели, не учитывающей спектральный состав зондирующего сигнала. Так в частности, в эксперименте используется импульсный режим возбуждения ПАВ, где более значимый вклад в изменение скорости ПАВ вносят именно низкочастотные составляющие спектра. Это обусловлено особенностями распространения ПАВ по объекту и их трансформации при излучении и прохождении через границу контактной поверхности образца.

Необходимо отметить, что профиль B(z)или $C_R(z)$ подбирается минимизацией функции среднеквадратичного отклонения измеренной дисперсионной кривой и дисперсионной кривой, получаемой из подбираемого профиля закалки по формуле Оулда. На первом этапе моделирования процесса распространения ПАВ для минимизации указанной функции использовался метод случайного поиска, хотя (как выяснилось) для повышения точности и уменьшения временных затрат существуют и другие методы.

О возможности оценки глубины упрочнения металлов методом гониометра

Как указывалось выше, в некоторых случаях представляется возможным оценивать глубину упрочненного слоя не по изменению скорости ПАВ, а по другим параметрам, непосредственно зависящим от нее. Ниже в качестве такого параметра используется угол падения волны на объект (формула (2)), при котором амплитуда возбуждаемой в нем ПАВ максимальная, а отраженной – минимальная, что реализуется методом гониометра.

Гониометрическая схема для определения глубины УП слоя приведена на рисунке 3. Сущность работы гониометра заключается в определении угла падения продольной волны на объект β_m , соответствующего минимуму амплитуды зеркально отраженной волны или максимуму возбуждаемой в образце ПАВ. При этом, как упоминалось ранее, в соответствии с законом Снеллиуса величина β_m = arcsin(C_1/C_R). Т. е. β_m является косвенным параметром, зависящим от скорости ПАВ и, что естественно, от глубины УП слоя.

Апробация гониометрической схемы измерений приведена на образцах серого чугуна с поверхностным отбелом разной толщины, а также образцах с упрочненным ТВЧ закалкой слоем (без среза и со срезом). На опорные поверхности окна ванны 1 с иммерсионной средой 2 помещают исследуемый образец 3, обращенный к преобразователям 4 и 5 плоской (отражающей звук) поверхностью. В этой плоскости находится ось вращения излучающего и принимающего УЗК преобразователей 4 и 5.



Рисунок 3 – Принципиальная схема работы гониометра для контроля свойств поверхности металла: 1 – опорная поверхность; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец; 4 – излучающий и 5 – приемный пьезопреобразователи; 6 – коромысла

Figure 3 – Schematic diagram of the operation of the goniometer to control the properties of the metal surface: 1 – supporting surface; 2 – immersion medium; 3 – sample; 4 – radiating and 5 – receiving ultrasonic probes; 6 – rocker



Рисунок 4 – Отклонение угла минимума амплитуды отраженного сигнала $\Delta\beta_m$ в зависимости от толщины отбела на сером чугуне

Figure 4 – Deviation of the angle of the minimum amplitude of the reflected signal $\Delta\beta_m$ vs. the thickness of chill on gray iron

Результаты исследований, проведенных на образцах стали Ст45 с упрочненным ТВЧ закалкой слоем как без среза (глубиной *H*), так и при наличии среза (высотой *h*) показали, что изменение этих величин в диапазоне

 $\{H, h\} = 0-1, 4$ мм сопровождается изменением β_m не более, чем на $|\Delta\beta_m| = 22-25'$. Причем $\Delta\beta_m(h) < 0$, а $\Delta\beta_m(H) > 0$. Т. е. увеличение глубины УП слоя, обладающего меньшей, чем основа металла скоростью C_R (и модулем Юнга E) как бы «размягчает» исследуемую среду и приводит согласно закону Снеллиуса (при учете формулы (1)) к росту β_m и наоборот. Отметим, что указанные зависимости $\Delta\beta_m(h)$ и $\Delta\beta_m(H)$ выходят на насыщение при $\{H_1, h_2\} > 1-1, 1$.

Что касается исследований, проведенных на образцах серого чугуна с поверхностным отбелом (рисунок 4), то в соответствии со сказанным выше величина $\Delta\beta_m < 0$ и достигает $\Delta\beta_m \approx -6^\circ$, что практически в 14–16 раз больше, чем при ТВЧ закалке.

Как указывалось выше, такой результат обусловлен преимущественно существенной разницей упругих модулей отбела и чугуна (в разы) при небольшой разнице их плотностей. Важно также отметить характерную особенность хода экспериментальной зависимости изменения $C_p(H_1)$, заключающуюся в том, что в диапазоне $H_{\lambda}=$ 0–0,7 величина $\Delta\beta_m\sim H_{\lambda}$, а при $H_{\lambda}>$ 1 наблюдается даже некоторое снижение абсолютной величины Δβ. По-видимому, это обусловлено особенностями проявления волноводных свойств исследуемой слоистой системы и рассеяние падающего акустического пучка в области переходного слоя отделяющего структуру серого чугуна (с преимущественно перлитной фазой) и отбела.

Интересно, что проведенные в работе [12] исследования зависимости C_R от глубины отбела на сером чугуне (марка не указана) показали квазилинейный характер именно роста функции $C_R(H_\lambda)$ вплоть до $H_\lambda \approx 1$. (К сожалению, в работе отсутствует конкретизация акустических свойств контактирующих металлов).

Таким образом, результаты исследования амплитудно-угловых характеристик на поверхностно упрочненных образцах чугуна и стали показали, что наибольшая надежность и точность измерений глубины УП слоя может быть достигнута именно в том случае, когда объектом исследования является чугун с поверхностным отбелом. При этом в ряде случаев требования к точностным параметрам гониометрической установки и условиям ее эксплуатации могут быть даже снижены, что позволит использовать метод гониометра в цеховых условиях, а также, что весьма важно, для контроля толщины отбела на объектах цилиндрической формы с характерным радиусом кривизны $R > R^*$. При этом прозвучивание объекта должно осуществляться при совпадении плоскости падения УЗК на объект и образующей к нему.

На основании проведенных исследований и их практического использования можно сделать заключение, что именно применение импульснофазового метода является наиболее эффективным и удобным при определении глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя при погрешности измерений ≈ 10–15 %. Получение же подобного результата в цеховых условиях методом гониометра весьма затруднительно, что связано с необходимостью реализации иммерсионного варианта ввода-приема падающего на объект акустического пучка и использования прецезионной установки, а также высокими требованиями к обработке контролируемой поверхности.

В то же время существует возможность повышения точностных и эксплуатационных параметров гониометрического метода контроля путем использования предложенного нами в работе [11] способа измерений. В этом случае для создания акустического контакта предлагается использовать локальную иммерсионную ванну, создаваемую путем удержания магнитной жидкости в любом пространственном положении с помощью пондеромоторных сил $\vec{f} = \mu_0 M \nabla H_r$ где М-намагниченность магнитной жидкости; Н_с-напряженность магнитного поля. При проведении же измерений используется не теневой режим, а режим эхо. В этом случае акустический пучок дважды отражается от контролируемого объекта, что существенно сказывается на изменении амплитуды отраженного луча и, естественно, на повышении точности измерении угла β....

Заключение

Проведен краткий анализ известных работ, посвященных определению глубины упрочненных поверхностных слоев различными методами, включая ТВЧ закалку, цементацию и др., и показана эффективность использования именно акустических методов для решения этих задач. Обращено внимание на необходимость реализации импульсно-фазового метода, связывающего скорость поверхностной волны с параметрами упрочненного слоя, включая его глубину и профиль твердости.

На основе интегрального выражения Оулдера, используя упрощенную модель, выполнен расчет зависимости, связывающей скорость волны, ее частоту, глубину упрочненного слоя и пространственное распределения твердости, представляемой в виде ступеньки с изменяющимся наклоном ее боковой поверхности, моделирующей переходную зону упрочненного слоя. Импульсным методом с использованием малоапертурных преобразователей частотой 1–3,8 МГц получены зависимости скорости поверхностной волны от высоты среза упрочненного ТВЧ закалкой слоя.

Проведенное сравнение данных эксперимента и расчетов упрощенной теоретической модели показало хорошее качественное соответствие между ними, демонстрируя высокую «чувствительность» метода по отношению к характеру изменения твердости по глубине упрочненного слоя. Полученные данные являются основой для решения обратной задачи по восстановлению пространственного распределения твердости на основе анализа частотно-фазовых характеристик поверхностных волн.

Проведена апробация на стальных образцах и образцах серого чугуна метода гониометра для определения глубины (и толщины среза металла) в упрочненном ТВЧ закалкой слое стальных образцов и толщины отбела на сером чугуне по данным угла В,, соответствующего условию достижения минимума амплитуды зеркально отраженной волны. При этом возбуждаемая в образце ПАВ достигает максимума амплитуды. Показано, что изменение этого угла в зависимости от толщины среза или глубины упрочненного ТВЧ закалкой слоя составляет всего 24-26', а глубины отбеленного чугуна в 14-16 раз больше. На основании полученных результатов даны рекомендации по их использованию на практике.

Благодарности

Эта работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по контракту T17-159 от 18.04.2017.

Список использованных источников

1. *Cuffe, J.* Eddy Current Measurement of Case Hardened Depth of Steel Components / J. Cuffe [et al.] // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct. 25–28. – 2008. – P. 5.

2. *Moorthy, V.* Important factors influencing the magnetic Barkhausen noise profile / V. *Moorthy* //

IEEE Transactions on Magnetics. – 2016. – Vol. 52, iss. 4. – P. 221–227. **DOI:** 10.1109/TMAG.2015.2502222

3. *Баев, А.Р.* О возбуждении ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем / А.Р. Баев [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012, № 3. – С. 11–18.

4. Кондратьев, А.И. Влияние термообработки на акустические характеристики материалов / А.И. Кондратьев, А.Н. Иванов, С.Н. Химунин // Дефектоскопия. – 2006. – № 3. – С. 28–31.

5. *Гурченко, П.С.* Ультразвуковой метод измерения глубины упрочненных слоев / П.С. Гурченко, А.А. Солонович, А.Л. Майоров // Индукционный на-грев. – 2009. – № 7. – С. 11–14.

6. *Гуляев, Ю.В.* Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / Ю.В. Гуляев [и др.] // Москва : Наука, 1991. – 10 с.

7. *Good, M.S., Schuster, G.J., Skorpik, J.R.* Ultrasonic Material Hardness Depth Measurement. United States Patent, Patent No. 5646351, 1997.

8. Baqeri, R. Case Depth Profile Measurement of Hardened Components Using Ultrasonic Backscattering Method / R. Baqeri, F. Honarvar, R. Mehdizad // 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, April 16–20. – 2012.

9. Theiner, W. Process Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Depth Hardened Parts / W. Theiner, R. Kern, M. Stroh // European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2002), Barcelona, Spain, June 17–21. – 2002.

10. Басацкая, Л.В. Дифракция ультразвуковых волн в поверхностно-закаленном слое металлов и метод измерения глубины закаленного слоя / Л.В. Басацкая, А.Ч. Вопилкин, А.П. Шишов // Дефектоскопия. – № 7. – 1988. – С. 54–65.

11. Способ ультразвукового контроля поверхности твердого тела / А.Р. Баев, А.Л. Майоров, М.А. Тищенко, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов. – Патент РБ на изобретение № 1475, Б.И. № 4, 2011. – С. 130–131.

12. Воронкова, Л.В. Контроль чугунных отливок ультразвуком. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 25 с.

Acknowledgments

This work was carried out with the support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract No. T17-159 of 18.04.2017.

References

1. Cuffe J., Sun H., Plotnikov Y., Nath S., Sheila-Vadde A. Eddy Current Measurement of Case Hardened Depth of Steel Components. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Oct. 25–28, Shanghai, China, 2008, 5 p.

2. Moorthy V. Important factors influencing the magnetic Barkhausen noise profile. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, vol. 52, iss. 4, pp. 221–227.

DOI: 10.1109/TMAG.2015.2502222

3. Baev A.R., Majorov A.L., Asadchaja M.V., Sergeeva O.S., Konovalov G.E. [On the excitation of surfactants in metals with a surface hardened layer] *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 3, pp. 11–18 (in Russian).

4. Kondrat'ev A.I., Ivanov A.N., Himunin S.N. Effect of thermal treatment on acoustic characteristics of materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 167–173.

5. Gurchenko P.S., Solonovich A.A, Majorov A.L. [Surface acoustic waves in inhomogeneous media] / *«Induktsionnyj nagrev»* [Induction heating], 2009, no. 7, pp. 11–14 (in Russian).

6. Guljaev JU.V., Krylov V.V., Birjukov S.V., Plesskij .P. *Poverkhnostnye akusticheskie volny v neodnorodnykh sredakh* [Surface acoustic waves in inhomogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 210 p.

7. Good M.S., Schuster G.J., Skorpik J.R. Ultrasonic Material Hardness Depth Measurement. United States Patent, Patent no. 5646351, 1997.

8. Baqeri R., Honarvar F., Mehdizad R. Case Depth Profile Measurement of Hardened Components Using Ultrasonic Backscattering Method. *18th World Conference on Nondestructive Testing*, April 16–20, Durban, South Africa, 2012.

9. Theiner W., Kern R., Stroh M. Process Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Depth Hardened Parts. *European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2002)*, June 17–21, Barcelona, Spain, 2002.

10. Basackaja L.V., Vopilkin A.Ch., Shishov A.P. [Ultrasonic waves diffraction in a surface-quenched metal layer and a method for measuring the depth of a quenched layer]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1988, no. 7, pp. 54–65 (in Russian).

11. Baev A.R., Majorov A.L., Tishhenko M.A., Asadchaja M.V., Konovalov G.E. *Sposob ul'trazvukovogo kontrolya poverkhnosti tverdogo tela* [Method for ultrasonic testing of a solid surface]. Patent RB no. 1475, B.I. No. 4, 2011, pp. 130–131.

12. Voronkova L.V. *Kontrol' chugunnykh otlivok ul'trazvukom* [The control of iron castings by ultrasound]. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2005, 25 p.

Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0»

А.М. Тимофеев

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 11.01.2019 Принята к печати 28.02.2019

При измерении маломощных оптических сигналов приемные модули систем должны обеспечивать достаточно высокую достоверность принятых данных. В этой связи целесообразно использовать счетчики фотонов, которые являются высокочувствительными, однако характеризуются ошибками регистрации данных. Цель работы – оценка влияния средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации с учетом мертвого времени счетчика фотонов.

На основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов получено выражение для оценки достоверности принятых двоичных данных при их регистрации в волоконно-оптическом канале связи.

Установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} достоверность принятых данных вначале практически не изменяется и близка к единице, однако затем спадает. Причем при прочих равных параметрах с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа τ_d спад этой зависимости наблюдается при больших значениях n_{s0} : при $n_{s0} \ge 66,6 \cdot 10^3$ с⁻¹ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} \ge 74,1 \cdot 10^3$ с⁻¹ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} \ge 83,5 \cdot 10^3$ с⁻¹ для $\tau_d = 10$ мкс; при $n_{s0} \ge 95,6 \cdot 10^3$ с⁻¹ для $\tau_d = 15$ мкс.

Ключевые слова: достоверность принятой информации, счетчик фотонов, мертвое время.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.М. Тимофеев	A.M. Timofeev
Белорусский государственный университет информатики и	Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
радиоэлектроники,	Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь	e-mail: tamvks@mail.ru
e-mail: tamvks@mail.ru	-
Для цитирования:	For citation:
А.М. Тимофеев.	A.M. Timofeev.
Методика повышения достоверности принятых данных счетчика	[Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the
фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче	Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate
двоичных символов «0».	During the Transmission of Binary Symbols «0»].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 80–89.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 80-89 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»

A.M. Timofeev

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus

Received 11.01.2019 Accepted for publication 28.02.2019

Abstract

When measuring low-power optical signals, the receiving modules of systems should ensure a sufficiently high accuracy of the received data. In this regard, it is advisable to use photon counters. They are highly sensitive, but are characterized by data recording errors. The aim of this work was to determine the effect of the average pulse count rate of photons at the output of the counter on the reliability of the received information with the dead time photon counter.

An expression for estimating the reliability of the received binary data when they were registered in the fiber-optic communication channel was obtained. This expression takes into account the statistical distributions of the number of pulses at the output of the photon counter.

Studies have shown that with increasing n_{s0} , the reliability of the data obtained at the beginning is practically does not change and is close to unity, and then decreases. Moreover, all other parameters being equal, with an increase in the average duration of the dead time of the prolonging type τ_d , this dependence decreases with large values of n_{s0} : with $n_{s0} \ge 66, 6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 0$; with $n_{s0} \ge 74, 1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$; with $n_{s0} \ge 83, 5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$; with $n_{s0} \ge 95, 6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ for $\tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$.

Keywords: reliability of received information, photon counter, dead time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
А.М. Тимофеев	A.M. Timofeev
Белорусский государственный университет информатики и	Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
радиоэлектроники,	Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь	e-mail: tamvks@mail.ru
e-mail: tamvks@mail.ru	U U U U U U U U U U U U U U U U U U U
Для цитирования:	For citation:
А.М. Тимофеев.	A.M. Timofeev.
Методика повышения достоверности принятых данных счетчика	[Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the
фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче	Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate
двоичных символов «0».	During the Transmission of Binary Symbols «0»].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 80–89.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 80–89 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-80-89

Введение

В настоящее время к приемникам оптической информации предъявляют достаточно высокие требования при измерении мощности оптического сигнала, что особенно актуально, когда уровень мощности сигнала соответствует в среднем от одного до нескольких десятков фотонов на каждый передаваемый бит (символ) [1-4]. Регистрация подобных маломощных оптических сигналов возможна посредством высокочувствительных приемных модулей - счетчиков фотонов, широко используемых в системах волоконно-оптической связи и позволяющих решать разнообразные задачи информационной безопасности: обеспечивать конфиденциальность и целостность данных, выполнять идентификацию данных и их отправителя и др. [1-8]. При этом весьма важно, чтобы приемное оборудование легитимных пользователей обеспечивало высокую достоверность принятых данных.

Под достоверностью принятых данных будем понимать вероятность того, что принятые данные соответствуют переданным.

Следует отметить, что на величину достоверности принятых данных будет влиять, в частности, мертвое время счетчика фотонов – время, в течение которого счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [9–12]. Это объясняется тем, что в результате наличия мертвого времени счетчика фотонов возникают ошибки при регистрации оптической информации. Однако в литературных источниках отсутствует оценка влияния средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче двоичных данных на достоверность принятой информации.

Объектом исследования являлся асинхронный двоичный несимметричный однородный волоконно-оптический канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен тем, что его использование не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приема синхроимпульсов [13, 14]. Мертвым временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [5, 14]. Целью данной работы являлось установить влияние средней скорости счета импульсов на выходе счетчика фотонов на достоверность принятой информации при передаче данных по волоконно-оптическому каналу связи с учетом наличия мертвого времени счетчика фотонов.

Выражения для оценки достоверности принятых двоичных символов «0» и символов «1»

Дальнейшие рассуждения основаны на том, что передача информации осуществляется по волоконно-оптическому каналу связи двоичными символами («0» и «1») в течение длительности времени т_ь. Причем при передаче символов «О» и «1» используются оптические сигналы мощностью W_1 и W_2 соответственно ($W_1 < W_2$), которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов и транслируются в линию связи в течение длительности времени однофотонной передачи $\Delta t = \tau_b/2$, а прием – с помощью счетчика фотонов, выполненного на базе лавинного фотоприемника, включенного по схеме пассивного гашения лавины [5, 14]. Следовательно, в течение длительности времени $t_{\rm p} = \tau_{\rm p}/2$ данные в канал связи не передаются, т.е. между каждой парой символов находится так называемый «защитный» временной интервал. Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной мощности, то на выходе счетчика фотонов за время Δt формируется различное количество электрических импульсов, которое будет прямо пропорционально мощности оптического излучения.

Всеми потерями информации, за исключением потерь в счетчике фотонов, пренебрегаем.

Обозначим вероятности появления символов «0» и «1» на входе канала связи как $P_s(0)$ и $P_s(1)$ соответственно, вероятности появления символов «0» и «1» на выходе канала связи как $P'_s(0)$ и $P'_s(1)$ соответственно и вероятность того, что при передаче символа «0» или «1» на выходе счетчика фотонов не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», как $P'_s(-)$.

Исходя из определения достоверности принятых данных, запишем выражения для расчета вероятности того, что принятые счетчиком фотонов символы «0» и символы «1» соответствуют переданным [13, 15]:

$$D_0 = 1 - P_{osh0} \ \text{in } D_1 = 1 - P_{osh1}, \tag{1}$$

где P_{osh0} и P_{osh1} – вероятности ошибочной регистрации символов «0» и «1» соответственно.

Входящие в выражения (1) вероятности $P_{\it osh0}$ и $P_{\it osh1}$ могут быть вычислены на основе формул [16]:

$$P_{osh0} = 1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{\left[(n_t + n_{s0}) (\Delta t - \tau_d) \right]^N \exp\left[- (n_t + n_{s0}) (\Delta t - \tau_d) \right]}{N!} ; (2)$$

$$P_{osh1} = \sum_{N=0}^{N_2} \frac{\left[(n_t + n_{s1}) (\Delta t - \tau_d) \right]^N \exp\left[- (n_t + n_{s1}) (\Delta t - \tau_d) \right]}{N!} , (3)$$

где N_1 и N_2 – нижний и верхний пороговые уровни регистрации соответственно, n_t – средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов, n_{s0} и n_{s1} – средние скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» и «1» соответственно, τ_d – средняя длительность мертвого времени продлевающегося типа.

Отметим, что для оценки мертвого времени продлевающегося типа используют среднее значение, т.к. его длительность зависит от интенсивности оптического излучения [14, 16].

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счетчика фотонов соответственно в отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [14, 16].

Нижний и верхний пороговые уровни регистрации – это соответственно наименьшее и наибольшее число зарегистрированных на выходе счетчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа N_2 делается вывод, что передан символ «1», а при регистрации импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , принимается решение, что символ отсутствует [14, 16].

Таким образом, алфавит кодовых слов на входе канала связи не совпадает с алфавитом кодовых слов на его выходе; вероятность отсутствия символа («0» или «1») на выходе канала связи, как и вероятность его приема, не зависит ни от того, какой символ был на входе канала, ни от ранее принятых символов; при передаче символа («0» или «1») на выходе канала связи может быть не зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1». С учетом приведенных выше особенностей и классификации, представленной в [13, 15], рассматриваемый канал связи является волоконнооптическим асинхронным двоичным несимметричным однородным без памяти и со стиранием. Путем подстановки (2) и (3) в соответствующие формулы (1) запишем выражения для оценки достоверности принятых символов «0»:

$$D_{0} = \sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[\left(n_{t} + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]^{N} \exp\left[- \left(n_{t} + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]}{N!}$$
(4)

и достоверности принятых символов «1»:

$$D_{1} = 1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} .$$
 (5)

Выражение для оценки достоверности принятых данных

Поскольку в общем случае принимаемые двоичные данные содержат как символы «0», так и символы «1», следовательно, для оценки достоверности принятых данных воспользуемся следующей формулой:

$$D = P_{s}'(0)D_{0} + P_{s}'(1)D_{1}.$$
(6)

Анализ выражений (4), (5) и результатов, полученных ранее в работе [17], позволяет сделать вывод о том, что достоверности D_0 и D_1 равны соответственно P(0/0) и P(1/1) – вероятности регистрации на выходе канала связи символов «0» и символов «1» при наличии на входе канала связи символов «0» и «1». Тогда согласно [18] получаем:

$$D_0 = P(0/0) = 1 - P(1/0) - P(-/0);$$
⁽⁷⁾

$$D_1 = P(1/1) = 1 - P(0/1) - P(-/1),$$
(8)

где P(1/0) и P(0/1) – вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» и символов «0» при наличии на входе канала связи символов «0» и «1» соответственно, P(-/0) и P(-/1) – вероятности того, что на выходе канала связи не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на входе канала связи был сформирован символ «0» и символ «1» соответственно.

Сопоставив выражения (7), (8) с соответствующими формулами (1), можно убедиться в том, что вероятности P(-/0) и P(-/1) являются составляющими вероятностей ошибочной регистрации данных P_{osh0} и P_{osh1} . Вероятности P(-/0)и P(-/1) учитывают ошибки, которые имеют место, когда на выходе канала связи символ («0» или «1») не будет зарегистрирован. Возникают эти ошибки при регистрации счетчиком фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 . Однако такие ошибки не будут влиять на достоверность приема символов «0» D_0 и символов «1» D_1 , поскольку в случае регистрации счетчиком фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , на выходе канала связи не регистрируется ни символ «0», ни символ «1» вне зависимости от того, какой символ был на входе канала связи. Учитывая приведенные выше рассуждения и исходя из определения достоверности принятых данных, формулы для расчета D_0 и D_1 запишем в следующем виде:

$$D_{_{0}} = \frac{P(0/0)}{P(0/0) + P(0/1)};$$
(9)

$$D_{1} = \frac{P(1/1)}{P(1/1) + P(1/0)}.$$
(10)

Переходные вероятности P(0/0), P(0/1) и P(1/1), P(1/0), входящие в соответствующие

выражения (9) и (10), могут быть рассчитаны на основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов [17]:

$$P(0/0) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{\left[\left(n_t + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]^N \exp\left[- \left(n_t + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]}{N!} ; (11)$$

$$P(0/1) = \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{\left[\left(n_t + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]^N \exp\left[- \left(n_t + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]}{N!}; (12)$$

$$P(1/1) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{\left[\left(n_t + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]^N \exp\left[- \left(n_t + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]}{N!};$$
(13)

$$P(1/0) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{\left[\left(n_t + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]^N \exp\left[- \left(n_t + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_d \right) \right]}{N!}.$$
 (14)

Подставим выражения (11) и (12) в формулу (9), тогда достоверность принятых символов «0» равна:

$$D_{0} = \frac{\sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!}}{\sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1}) (\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} \cdot (15)$$

Формула достоверности принятых символов «1» может быть получена путем подстановки (13) и (14) в выражение (10), тогда:

$$D_{1} = \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[\left(n_{t} + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]^{N} \exp\left[- \left(n_{t} + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]}{N!}}{2 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[\left(n_{t} + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]^{N} \exp\left[- \left(n_{t} + n_{s1} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]}{N!} - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[\left(n_{t} + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]^{N} \exp\left[- \left(n_{t} + n_{s0} \right) \left(\Delta t - \tau_{d} \right) \right]}{N!} \cdot (16)$$

Предположим, что на выходе рассматриваемого канала связи зарегистрирована случайная последовательность двоичных данных, для которой $P'_{s}(0) = P'_{s}(1) = 0,5$ [5, 18]. В этом

случае достоверность принятых данных определяется подстановкой формул (15) и (16) в выражение (6) и окончательно примет следующий вид:

$$D = 0,5 \times \left\{ \frac{\sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!}}{\sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \sum_{N=N_{1}}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!}}{N!} \right\} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s1})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]^{N} \exp\left[- (n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} + \frac{1 - \sum_{N=0}^{N_{2}} \frac{\left[(n_{t} + n_{s0})(\Delta t - \tau_{d}) \right]}{N!} +$$

Влияние средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» на достоверность принятых данных

Вычисление достоверности принятых данных выполнялось для каналов связи, содержащих в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа при различных значениях τ_d и n_{so} .

На рисунке 1 представлены зависимости достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов *n*_{s0} для различной средней длительности мертвого времени продлевающегося типа.



Рисунок 1 – Зависимость достоверности принятых данных от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ мкс}$; средняя длительность мертвого времени: $1 - \tau_d = 0$, $2 - \tau_d = 5 \text{ мкс}$, $3 - \tau_d = 10 \text{ мкс}$, $4 - \tau_d = 15 \text{ мкс}$

Figure 1 – Dependence of the reliability of the received data from the average count rate of the signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1, N_2 = 7, n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}, \tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: $1 - \tau_d = 0, 2 - \tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}, 3 - \tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}, 4 - \tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

Зависимости $D(n_{s0})$ построены в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов, на которых переходные вероятности $P(0/0) \ge 0.5$ при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа. Это обусловлено тем, что для рассматриваемого канала связи при P(0/0) < 0.5 использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится нецелесообразным. Для сравнения полученных зависимостей $D(n_{s0})$ величины средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1} фиксировались постоянными и выбирались следующим образом. Вначале определялись диапазоны средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s1}, на которых переходные вероятности $P(1/1) \ge 0,5$ при заданных средних длительностях мертвого времени продлевающегося типа, по аналогии с выбором

диапазона значений n_{s0}. Затем из каждого полученного диапазона выбиралось оптимальное значение *n*_{s1}. При этом критерием оптимальности являлось наименьшее значение n_{s1} , при котором переходная вероятность P(0/1) минимальна. Такой выбор скорости счета сигнальных импульсов *n*₋₁ позволяет обеспечить наибольшие значения достоверности принятых данных. Расчет проводился для одинаковых значений нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации $N_1 = 1$ и $N_2 = 7$, средней скорости счета темновых импульсов $n_{r} = 10^{3} \text{ c}^{-1}$ и среднего времени передачи одного бита (символа) $\tau_{h} = 100$ мкс. Необходимо также отметить, что пороговые уровни регистрации можно выбирать и другими, отличными от 1 и 7, но при сравнении зависимостей $D(n_{0})$ для различных средних длительностей мертвого времени следует фиксировать N₁ и N₂ постоянными, как и среднее значение скорости счета темновых импульсов n, и среднее время передачи одного бита (символа) т_ь. При этом важно учитывать, что для рассматриваемого канала связи τ_d не может превышать Δt , которое, в свою очередь, должно быть меньше средней длительности передачи одного бита (символа) τ_{h} на величину защитного временного интервала; в противном случае использование счетчиков фотонов для регистрации данных становится нецелесообразным. Отметим, что при других значениях N₁, N₂, и отношениях $\tau_d/\Delta t$, n_t/n_{s0} и n_t/n_{s1} проявление эффекта мертвого времени продлевающегося типа для рассматриваемого канала связи аналогично представленному на рисунке 1.

Как видно из полученных результатов (см. рисунок 1), для всех исследуемых значений τ_d с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} зависимости $D(n_{s0})$ вначале практически не изменяются и близки к единице, однако затем – спадают. Причем с увеличением средней длительности мертвого времени продлевающегося типа этот спад наблюдается при больших значениях n_{s0} . Так, например, зависимости $D(n_{s0})$ начинают уменьшаться соответственно при $n_{s0} \ge 66, 6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{для } \tau_d = 0; при <math>n_{s0} \ge 74, 1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} \ge 83, 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{для } \tau_d = 10$ мкс; при $n_{s0} \ge 95, 6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{для } \tau_d = 15$ мкс.

Указанные особенности поведения зависимостей $D(n_{s0})$ объясняются характером изменения переходных вероятностей P(0/0) и P(1/0) с увеличением средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , что иллюстрируется рисунком 2.



Рисунок 2 – Зависимости переходных вероятностей P(0/0), кривые 1–4, и P(1/0), кривые 1'–4', от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$, $\tau_b = 100$ мкс; средняя длительность мертвого времени: 1 и 1' – $\tau_d = 0$, 2 и 2' – $\tau_d = 5$ мкс, 3 и 3' – $\tau_d = 10$ мкс, 4 и 4' – $\tau_d = 15$ мкс

Figure 2 – Dependences of transition probabilities P(0/0), curves 1–4, and P(1/0), curves 1'–4', on the average count rate of signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: 1 and 1' – $\tau_d = 0$, 2 and 2' – $\tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$, 3 and 3' – $\tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$, 4 and 4' – $\tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

Из рисунка 2 видно, что с увеличением средней скорости счета сигнальных импульсов *n*₅₀ вероятность регистрации на выходе канала связи символов «О» при наличии на входе канала связи символов «0» P(0/0) растет, достигая наибольшего значения, после чего - спадает. Это имеет место как при наличии мертвого времени продлевающегося типа (рисунок 2, кривые 2-4), так и при его отсутствии (рисунок 2, кривая 1). Причем максимумы зависимостей P(0/0) от n_{e0} наблюдаются при наименьших средних скоростях счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых соответствующие зависимости $D(n_{s0})$ спадают: при $n_{s0} = 66, 6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} = 74, 1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} = 83,5 \cdot 10^3$ с⁻¹ для $\tau_d = 10$ мкс; при $n_{s0}^d = 95, 6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Для всех исследуемых средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , при которых соответствующие зависимости P(0/0) от n_{s0} растут вплоть до своих максимальных значений, вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» при наличии на входе канала связи символов «0» P(1/0)практически неизменны и близки к нулю. Однако в диапазонах n_{s0} , на которых соответствующие зависимости P(0/0) от n_{s0} уменьшаются, зависимости P(1/0) от n_{s0} растут (рисунок 2).

Такое поведение зависимостей P(0/0) и P(1/0) с ростом n_{s0} объясняется тем, что

статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при регистрации символов «0» $P_{\rm scl}(N)$ имеют явно выраженный максимум, свойственный распределению Пуассона [5, 14, 16]. При малых значениях n_{s0} этот максимум близок к N = 0 [16], поэтому $P(1/0) \approx 0$, а вероятность того, что на выходе канала связи не будет зарегистрировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на входе канала связи был сформирован символ «0» P(-/0), достаточно большая. Это приводит к тому, что переходная вероятность P(0/0) не достигает свого наибольшего значения. С увеличением *п*₅₀происходит сдвиг максимумов статистических распределений P_{st0}(N) в сторону больших значений N [16], следовательно, повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве N₁-N₂. Это способствует уменьшению переходной вероятности P(-/0) и росту переходной вероятности P(0/0) вплоть до ее максимального значения. При дальнейшем увеличении средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} максимумы статистических распределений P_{st0}(N) продолжают сдвигаться в сторону еще больших значений N. Это приводит к увеличению вероятности того, что на выходе счетчика фотонов будет зарегистрировано импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации N_2 , поэтому переходные вероятности P(-/0)и P(0/0) уменьшаются, а переходная вероятность *P*(1/0) растет.

В результате в диапазоне n_{s0} , на котором $P(1/0) \approx 0$, зависимость $D(n_{s0})$ практически неизменна и близка к единице (рисунок 1) за счет того, что отношение $P(1/0) / P(0/0) \approx 0$, что иллюстрируется рисунком 3.

В диапазоне n_{s0} , на котором с увеличением n_{s0} переходная вероятность P(0/0) уменьшается и зависимость P(1/0) от n_{s0} растет (рисунок 2), спад зависимости $D(n_{s0})$ объясняется ростом отношения P(1/0) / P(0/0) с увеличением n_{s0} (рисунок 3).

Также из рисунка 2 видно, что в диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0} , на которых зависимости P(0/0) от n_{s0} растут, увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах приводит к уменьшению переходных вероятностей P(0/0). Это обусловлено тем, что при увеличении τ_d максимумы статистических распределений $P_{st0}(N)$ сдвигаются

в сторону меньших значений N [16]. В результате такого смещения повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве, меньшем, чем N_1 , поэтому P(0/0) и P(1/0) уменьшаются. Так, например, при $n_{s0} = 65,0\cdot10^3$ с⁻¹ переходные вероятности P(0/0) и P(1/0) равны соответственно 94,33·10⁻² и 1,98·10² для $\tau_d = 0$; 93,74·10⁻² и 1,13·10⁻² для $\tau_d = 5$ мкс; 92,28·10⁻² и 0,58·10⁻² для $\tau_d = 10$ мкс; 89,81·10⁻² и 0,27·10⁻² для $\tau_d = 15$ мкс.



Рисунок 3 – Зависимость отношения P(1/0) / P(0/0) от средней скорости счета сигнальных импульсов n_{s0} : $N_1 = 1, N_2 = 7, n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}, \tau_b = 100 \text{ мкс}$; средняя длительность мертвого времени: $1 - \tau_d = 0, 2 - \tau_d = 5 \text{ мкс}, 3 - \tau_d = 10 \text{ мкс}, 4 - \tau_d = 15 \text{ мкс}$

Figure 3 – Dependence of the ratio P(1/0) / P(0/0) on the average count rate of the signal pulses n_{s0} : $N_1 = 1$, $N_2 = 7$, $n_t = 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\tau_b = 100 \text{ }\mu\text{s}$; average dead time: $1 - \tau_d = 0$, $2 - \tau_d = 5 \text{ }\mu\text{s}$, $3 - \tau_d = 10 \text{ }\mu\text{s}$; $4 - \tau_d = 15 \text{ }\mu\text{s}$

В диапазонах средних скоростей счета сигнальных импульсов n_{s0}, на которых зависимости P(0/0) от n_{s0} спадают, увеличение средней длительности мертвого времени продлевающегося типа при прочих равных параметрах также приводит к уменьшению переходных вероятностей P(1/0), однако переходные вероятности P(0/0)растут. Это объясняется тем, что в этих диапазонах значений n_{s0} максимумы $P_{st0}(N)$ располагаются в области достаточно больших значений N, поэтому весьма высока вероятность того, что на выходе счетчика фотонов будет зарегистрировано импульсов в количестве, превышающем верхний пороговый уровень регистрации N₂. Однако при прочих равных параметрах с ростом τ_d в таких диапазонах значений n₅₀ эта вероятность уменьшается, поскольку максимумы статистических распределений $P_{st0}(N)$ смещаются в сторону меньших значений *N*. При этом повышается вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов импульсов в количестве N₁-N₂, поэтому увеличивается переходная вероятность P(0/0) *Devices and Methods of Measurements* 2019, vol. 10, no. 1, pp. 80–89 *А.М. Тітобее* и уменьшается переходная вероятность *P*(1/0).

В результате, например, при $n_{s0} = 97,0.10^3 \text{ c}^{-1}$ переходные вероятности P(0/0) и P(1/0) равны соответственно $86,94 \cdot 10^{-2}$ и $12,31 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_{1} = 0$; 90,85·10⁻² и 7,94·10⁻² для $\tau_d = 5$ мкс; 93,37·10⁻² и 4,65·10⁻² для $\tau_d = 10$ мкс; 94,35·10⁻² и 2,41·10⁻² для $\tau_{d} = 15$ мкс. В свою очередь, это приводит, к тому, что в диапазоне n_{s0} , на котором имеет место спад переходной вероятности P(0/0), при прочих равных параметрах увеличение т_а повышает достоверность принятых данных за счет уменьшения отношения P(1/0) / P(0/0). Так, например, при $n_{s0} = 97,0.10^3 \text{ c}^{-1}$ достоверность принятых данных D и отношение P(1/0)/P(0/0)равны соответственно 94,28.10-2 и 14,16.10-2 для $\tau_d = 0$; 96,10·10⁻² и 8,74·10⁻² для $\tau_d = 5$ мкс; 97,56·10⁻² и 4,98·10⁻² для $\tau_d = 10$ мкс; 98,61·10⁻² и $2,56 \cdot 10^{-2}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Таким образом, для достижения наибольшей достоверности принятых данных следует выбирать средние скорости счета сигнальных импульсов при передаче символов «0» n_{e0}, при которых для заданной величины средней длительности мертвого времени продлевающегося типа т вероятность регистрации на выходе счетчика фотонов символов «О» при наличии на входе канала связи символов «0» P(0/0) максимальна. Максимальные же значения P(0/0), при которых достоверность принятых данных составляет 98,70·10⁻², с увеличением τ_d обеспечиваются при более высоких значениях n_{s0}: при $n_{s0} = 66, 6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} = 74, 1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} = 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10$ мкс; при $n_{s0} = 95, 6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Заключение

Получено выражение для расчета достоверности данных, принятых по двоичному волоконно-оптическому каналу связи, в котором в качестве приемного модуля используется счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Установлено, что с ростом средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} достоверность принятых данных *D* вначале практически не изменяется и близка к единице, однако затем спадает. Причем при прочих равных параметрах с увеличением средних длительностей мертвого времени продлевающегося типа τ_d спад зависимости $D(n_{s0})$ наблюдается при больших значениях средней скорости счета сигнальных импульсов: при $n_{s0} \ge 66,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 0$; при $n_{s0} \ge 74,1 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 5$ мкс; при $n_{s0} \ge 83,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 10$ мкс; при $n_{s0} \ge 95,6 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для $\tau_d = 15$ мкс.

Определено, что поведение зависимости $D(n_{s0})$ обусловлено характером изменения отношения вероятности регистрации на выходе канала связи символов «1» при наличии на его входе символов «0» P(1/0) к вероятности регистрации на выходе канала связи символов «0» при наличии на его входе символов «0» P(0/0) с ростом n_{s0} . Установлено, что в диапазонах n_{s0} , на которых имеет место спад зависимостей $D(n_{s0})$, при прочих равных параметрах увеличение τ_d повышает достоверность принятых данных D за счет уменьшения отношения P(1/0) / P(0/0).

Полученные результаты могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической асинхронной связи, позволяющих с высокой достоверностью выявлять несанкционированный доступ к каналу связи за счет уменьшения погрешности определения количества ошибок легитимного приемного оборудования, в качестве которого используются счетчики фотонов с мертвым временем продлевающегося типа.

Автору настоящей работы видятся весьма важными исследования теоретического характера по оценке влияния средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «1» на достоверность принятых данных, что планируется выполнить в ходе дальнейших комплексных исследований.

Список использованных источников

1. *Калачев, А.А.* Элементная база дальнодействующей квантовой связи. Часть 1 / А.А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 1. – С. 88–98.

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

2. *Zhang, J.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication / J. Zhang [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – Vol. 4. – P. 1–13. **DOI:** 10.1038/Isa.2015.59

3. *Stipčević, M.* Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range / M. Stipčević [et al.] // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 17448–17459. **DOI:** 10.1364/OE.18.017448

4. *Корытко, Н.Н.* Моделирование конструкции лавинных фотодиодов с охранными областями для регистрации маломощных световых потоков / Н.Н. Корытко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2011. – Т. 2. – № 1(2). – С. 32–39. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2011-0-1-19-22

5. Килин, С.Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин; под ред. С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцев. – Минск : Белорусская наука, 2007. – 391 с.

6. Румянцев, А.М. Эффективность синхронизации системы квантового распределения ключа на однофотонных лавинных фотодиодах / А.М. Румянцев, А.П. Пленкин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 9(182). – С. 4–15.

DOI: 10.18522/2311-3103-2016-9-415

7. *Cova, S.D.* Single-photon counting detectors / S.D. Cova, M. Ghioni // IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3. – No. 2. – P. 274–277.

DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2130518

8. Абед, А.Х. Метод шифрования передаваемой информации по случайному закону / А.Х. Абед // Вестник Томского государственного университета. – 2016. – Т. 22. – № 2. – С. 233–237.

DOI: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237

9. *Горцев, А.М.* Оценивание параметра непродлевающегося мертвого времени случайной длительности в пуассоновском потоке событий / А.М. Горцев, М.Е. Завгородняя // Вестник Томского государственного университета. – 2017. – № 40. – С. 32–40. **DOI:** 10.17223/19988605/40/4

10. *Castelletto, S.A.* Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multi-plexed detector array / S.A. Castelletto [et al.] // Journal of Modern Optics. – 2007. – Vol. 54. – P. 337–352.

DOI: 10.1080/09500340600779579

11. Zadeh, I.E. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution / I.E. Zadeh [et al.] // APL Photonics. – 2017. – Vol. 2. – P. 111301-1–111301-7.

DOI: 10.1063/1.5000001

12. Завгородняя, М.Е. Вероятностные характеристики потока событий с продлевающимся мертвым временем специального типа / М.Е. Завгородняя // Вестник Томского государственного университета. – 2018. – № 43. – С. 33–41.

DOI: 10.17223/19988605/43/4

13. *Клюев, Л.Л.* Теория электрической связи / Л.Л. Клюев. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 423 с.

14. *Гулаков, И.Р.* Фотоприемники квантовых систем: монография / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск : УО ВГКС, 2012. – 276 с.

15. Биккенин, Р.Р. Теория электрической связи / Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. – М. : Издательский цент «Академия», 2010. – 336 с.

16. Тимофеев, А.М. Оценка влияния продлевающегося мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации данных квантовокриптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2018. – № 1(147). – С. 56–62. 17. *Тимофеев, А.М.* Энтропия потерь однофотонного асинхронного волоконно-оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов с продлевающимся мертвым временем / А.М. Тимофеев // Актуальные проблемы науки XXI века. – 2018. – Вып. 7. – С. 5–10.

18. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 12-е изд. / В.Е. Гмурман. – М. : Издательство Юрайт, 2018. – 479 с.

References

1. Kalachev A.A. [Components of long-distance quantum communication. Part 1]. *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 1, pp. 88–98 (in Russian).

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

2. Zhang J., Itzler M.A., Zbinden H., Pan J.-W. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication. *Light: Science & Applications*, 2015, vol. 4, pp. 1–13. **DOI:** 10.1038/lsa.2015.59

3. Stipčević M., Skenderović H., Gracin D. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range. *Optics Express*, 2010, vol. 18, pp. 17448–17459. **DOI:** 10.1364/OE.18.017448

4. Koritko N.N., Zalesskij V.B., Malishev V.S., Khatko V.V. [Simulation of avalanche photodiode construction with guard areas]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2011, vol. 2, no. 1(2), pp. 32–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2011-0-1-19-22

5. Kilin S.Ya. *Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika* [Quantum cryptography: ideas and practices]. – Minsk, Belarus. Sci Publ., 2007, 391 p.

6. Rumyantsev K.Yu., Pljonkin A.P. [The effectiveness of synchronization of quantum key distribution system at the single-photon avalanche photodiodes]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, no. 9(182), pp. 4–15 (in Russian). **DOI:** 10.18522/2311-3103-2016-9-415

7. Cova S.D., Ghioni M. Single-photon counting detectors. *IEEE Photonics Journal*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 274–277. **DOI:** 10.1109/JPHOT.2011.2130518

8. Abed A.Kh. [Encryption method to transmit information at random]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2016, vol. 22, no. 2, pp. 233–237 (in Russian).

DOI: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.233-237

9. Gortsev A.M., Zavgorodnyaya M.E. [Estimation of the parameter of unextendable dead time random duration in the Poisson flow of events]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2017, no. 40, pp. 32–40 (in Russian).

DOI: 10.17223/19988605/40/4

10. Castelletto S.A., Degiovanni I.P., Schettini V., Migdall A.L. Reduced deadtime and higher rate photoncounting detection using a multiplexed detector array. *Journal of Modern Optics*, 2007, vol. 54, pp. 337–352. **DOI:** 10.1080/09500340600779579

11. Zadeh I.E., Los J.W., Gourgues R.B., Steinmetz V., Bulgarini G., Dobrovolskiy S.M., Zwiller V., Dorenbos S.N. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution. *APL Photonics*, 2017, vol. 2, pp. 111301-1– 111301-7. **DOI:** 10.1063/1.5000001

12. Zavgorodnyaya M.E. [Probabilistic characteristics of the flow of events with prolonging dead time of special type]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal], 2018, no. 43, pp. 33–41 (in Russian).

DOI: 10.17223/19988605/43/4

13. Klyuev L.L. *Teoriya ehlektricheskoj svyazi* [The theory of electrical communication]. Minsk, Techn.Perspect. Publ., 2008, 423 p.

14. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Fotopriemniki kvantovykh sistem: monografiya* [Photodetectors of quantum systems: monograph]. Minsk, EI HSCC, 2012, 276 p.

15. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Teoriya ehlektricheskoj svyazi* [The theory of electrical communication]. Moscow, Publ. Cent «Academy», 2010, 336 p.

16. Timofeev A.M. [Estimation of the photons counter lasting dead time influence on the probability of erroneous data registration of quantum-cryptographic communication channels]. *Vestnik svyazi* [Communication bulletin], 2018, no. 1(147), pp. 56–62 (in Russian).

17. Timofeev A.M. [Entropy of losses of a singlephoton asynchronous fiber-optic communication channel with a receiver based on a photon counter with prolonged dead time]. *Aktual'nye problemy nauki XXI veka* [Current issues of science in the 21st century], 2018, vol. 7, pp. 5–10 (in Russian).

18. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, Publ. Yurayt, 2018, 479 p.

Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведенной погрешности измерения

С.Г. Сандомирский

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 12.11.2018 Принята к печати 15.02.2019

Магнитный контроль механических свойств сталей основан на их корреляционных связях с магнитными параметрами. Целью данной работы являлось установление зависимости достижимого коэффициента корреляции $R_{\rm max}$ между результатами измерения и истинными значениями параметра от приведенной погрешности его измерения.

В статье предложена модель корреляционного поля между истинными значениями параметра и результатами его измерения с заданной приведенной погрешностью δ . Обоснованы достоинства и правомерность использования модели для оценки достижимого коэффициента корреляции $R_{\rm max}$. Проведен анализ влияния δ измерения параметра в разных диапазонах d его изменения на $R_{\rm max}$. Результаты сопоставлены с проведенным ранее анализом для относительной погрешности измерения.

Установлено, что коэффициент R_{\max} , рассчитанный для приведенной погрешности измерения, всегда меньше R_{\max} , рассчитанного для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d при $\delta \le 0.05$ разница между величинами R_{\max} , рассчитанными для приведенной и относительной погрешностей измерения, не велика. Это позволяет использовать разработанную формулу для зависимости $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ при $R_{\max} \ge 0.8$ как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения.

Полученный результат позволяет без измерений, по приведенной погрешности измерения метрологически аттестованного средства измерения, определить максимально достижимый коэффициент корреляции между истинными значениями и результатами измерения параметра в известном диапазоне его изменения. В качестве примера установлены условия использования для неразрушающего контроля сталей результатов измерения магнитных параметров установкой, аттестованной по приведенной погрешности измерения.

Ключевые слова: магнитные измерения, погрешность измерения, линейное уравнение регрессии, коэффициент корреляции.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
С.Г. Сандомирский	S.G. Sandomirski
Объединенный институт машиностроения Национальной	The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National
академии наук Беларуси,	Academy of Sciences of Belarus,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь	Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: sand_work@mail.ru	e-mail: sand_work@mail.ru
Для цитирования:	For citation:
С.Г. Сандомирский.	S.G. Sandomirski.
Зависимость коэффициента корреляции между результатами	[Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results
измерения параметра и его истинными значениями от приведенной	of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced
погрешности измерения.	Measurement Error].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 90–98.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced Measurement Error

S.G. Sandomirski

The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus

Received 12.11.2018 Accepted for publication 15.02.2019

Abstract

Magnetic testing of steels' mechanical properties is based on their correlation with steels' magnetic parameters. The purpose of this work was to establish dependence of the attainable correlation coefficient R_{max} between measurement results and the parameter values a on the reduced error of its measurement.

The article proposes a model of the correlation field between the parameter true values and the results of its measurement with a given reduced error δ . The merits and legitimacy of using the model for estimation of the achievable correlation coefficient R_{max} are substantiated. Analysis of influence of δ parameter measurement in different ranges *d* of its change on R_{max} is carried out. Results are compared with the previous analysis for the relative measurement error.

It has been established in this work that the coefficient R_{\max} calculated for the reduced measurement error is always smaller than R_{\max} one calculated for the relative measurement error. However in the practically important range of variation of d with $\delta \le 0.05$ the difference between the R_{\max} values calculated for the reduced and relative measurement errors is not large. This allows us to use the developed formula for the dependence $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ at $R_{\max} \ge 0.8$ for both relative and reduced measurement errors δ .

The obtained result allows us using the reduced measurement error of a metrologically certified measuring instrument to obtain the maximum attainable correlation coefficient between the true values and the results of measuring a parameter in a given range of its change without measurements. As an example, we define the conditions for the non-destructive testing of steels under which one can use measuring of magnetic parameters with the installation certified based on the reduced measurement error.

Keywords: magnetics measurements, error of measurement, linear regression equation, correlation coefficient.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
С.Г. Сандомирский	S.G. Sandomirski
Объединенный институт машиностроения Национальной	The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National
академии наук Беларуси,	Academy of Sciences of Belarus,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь	Akademicheskaya str., 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: sand_work@mail.ru	e-mail: sand_work@mail.ru
Для цитирования:	For citation:
С.Г. Сандомирский.	S.G. Sandomirski.
Зависимость коэффициента корреляции между результатами	[Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results
измерения параметра и его истинными значениями от приведенной	of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced
погрешности измерения.	Measurement Error].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 90–98.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 90–98 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-90-98

Введение

Магнитный контроль механических свойств сталей (твердости, временного сопротивления, относительного удлинения и др.) основан на их связях с магнитными параметрами [1, 2]. Физическая основа наличия таких связей в том, что и механические, и магнитные свойства сталей, каждая – по своему, определяются структурой металла (напряжениями, распределением диспергированных частиц в матрице сплава и дефектов в кристаллической решетке, величиной зерна и др.), формируемой при термических обработках. Поэтому связи между механическими и магнитными параметрами сталей имеют не функциональный, а корреляционный характер.

В математической статистике разработаны методы оценки корреляции между случайными величинами. При линейной регрессии между величинами *у* и *х*:

$$y(x) = x; (1)$$

наиболее точную информацию о силе связи между ними дает коэффициент корреляции *R*:

$$R = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y}) / \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}, (2)$$

где $\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i, \ \overline{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} y_i; \ n$ -число измерений.

Коэффициент корреляции не изменяется при изменении начала отсчета и масштаба измерения величин. Поэтому величину *R* между результатами прямых и косвенных (но более простых) измерений физических параметров используют в неразрушающих методах контроля для обоснования применения разработанных методик и приборов [2–6].

Установлено, что магнитным параметром, наиболее чувствительным к изменениям структуры и механических свойств сталей, является коэрцитивная сила H_c [1, 2]. Относительная погрешность δ измерения H_c по методике ГОСТа¹ не превышает ± 2 % [7].

Но высокая точность измерения магнитного параметра не достаточна для его использования при неразрушающем контроле механических

свойств сталей. Так, H_c оказалась не пригодна для контроля температуры отпуска T_0 закаленных изделий из сталей с содержанием углерода более 0,3 % (и связанных с ней временного сопротивления и твердости HRC, измеренной по шкале Роквелла). Причина – в неоднозначной зависимости H_c от T_0 при 400 °C $\leq T_0 \leq 600$ °C. Но большинство ответственных изделий из конструкционных сталей подвергают отпуску в этом интервале температур. Поэтому разработка достоверного метода контроля качества отпуска таких сталей стала главной задачей магнитного структурного анализа [1–6].

Для ее решения было предложено использовать релаксационные намагниченность M_{Hr} и магнитную восприимчивость χ_r . В работах [3, 5] предложено комплексное использование магнитных параметров. Для расчета твердости HRC сталей в модели [3] с разными весовыми коэффициентами суммируют результаты измерения $H_{c}, M_{Hr}, \chi_{r},$ их квадратичные члены и произведение $\chi_r M_{Hr}$. В модели [5] суммируют результаты измерения градиентов ∇H поля от остаточной намагниченности объекта контроля после ряда намагничиваний импульсным полем разной напряженности и направления. Методики измерения M_{Hr} , χ_r и ∇H не регламентированы ГОСТом¹, а б их измерения, даже по оценкам авторов, в несколько раз превосходят б измерения Н. Тем не менее, коэффициент R корреляции между результатами прямых физических и косвенных магнитных измерений HRC, рассчитанный по стандартной методике с использованием уравнения (2), для многих сталей в [3, 5] (и других работах) оказался настолько близок к «1» $(0,997 \le R \le 0,999)$, что впору было говорить не о корреляционной, а о линейной функциональной зависимости. Но возможно ли такое? Для действительного решения задачи контроля механических свойств и твердости изделий из среднеуглеродистых сталей стало актуальным определение математических ограничений достижимого коэффициента корреляции между результатами измерения и истинным значением параметра $R_{\rm max}$, определяемых погрешностью его измерения.

Для относительной погрешности измерения эта задача решена в [8]. Показано, что аномально высокие коэффициенты корреляции *R* при определении твердости и температуры термической обработки (закалки и отпуска) сталей

¹ ГОСТ 8.377–80 Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М. : Изд. стандартов, 1986. – 21 с.

по результатам измерений их магнитных параметров получены в [3, 5] и ряде других работ подбором корректирующих коэффициентов к конкретным результатам измерения параметров без учета их относительной погрешности измерения, набора статистических данных контроля и корреляционного анализа.

Но средства измерения характеризуют не только относительной (в процентах от результата измерения), но и приведенной (в процентах от верхнего предела измерения²) погрешностью измерения [9]. Целью статьи являлось установление зависимости величины достижимого коэффициента корреляции $R_{\rm max}$ между результатами измерения и истинными значениями параметров от приведенной погрешности их измерения.

Исходные предпосылки для расчета

В [8] предложена модель (рисунок 1*a*) корреляционного поля между результатами измерения и истинными значениями параметра от относительной погрешности его измерения. Показано, что, наряду с δ , важным фактом, влияющим на R_{max} между результатами прямых (принимаемых за истинное значение) и косвенных измерений параметра, является относительный диапазон *d* его изменения:

$$d = (x_{\max} - x_{\min}) / x_{\max}$$
, (3)

где x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное измеренные значения параметра *x*.

$$W_3(3): x_{\min} = x_{\max}(1-d).$$
(4)

В [8, 2] установлено, что максимальное значение $R_{\max}(\delta, d = \text{const})$ коэффициента корреляции R для любых δ и d имеет место, если количество одинаковых интервалов разбиения диапазона (3) изменения измеряемого параметра x (рисунок 1a) равно 1 – т. е. истинные значения x_1 и x_2 измеряемого параметра x соответствуют крайним значениям диапазона (3) его изменения: $x_1 = x_{\min}$; $x_2 = x_{\max}$. Для оценки достижимого коэффициента корреляции R_{\max} в практически важном диапазоне его изменения по значениям δ и d в [8] разработана формула:

$$R_{\max} \approx 1 - 0,866\delta^{1,82} d^{-2,25}$$
 (для $R_{\max} \ge 0,8$). (5)

На основании формулы (5) в [8, 2] решена обратная задача: оценки погрешности δ_{min} ,

² ГОСТ 8.401–80. Классы точности средств измерений. М.: Изд. стандартов, 1980. – 11 с.

при которой в известном диапазоне изменения параметра *d* теоретически может быть достигнут уровень коэффициента корреляции *R*_{max} между результатами измерения параметра и его истинными значениями:

$$\delta_{\min} \approx 1,3(1-R_{\max})^{0.55} d^{1,24}$$
 (для $R_{\max} \ge 0,8$). (6)

При $\delta > \delta_{\min}$ значение $R = R_{\max}$ не может быть достигнуто, если из массива измерений не сделана «целенаправленная» выборка. Решение этой обратной задачи невозможно при расчете коэффициента корреляции по формуле (2).

Основываясь на этих результатах, установим зависимости достижимого коэффициента корреляции $R_{\rm max}$ между результатами измерения и истинными значениями параметра от приведенной погрешности его измерения.

Модель для расчета

Пусть в результате измерения каждого из значений x_i параметра x получено два результата y_i^{\pm} его измерения (рисунок 1*b*), равные

$$y_i^{\pm} = x_i \pm x_d \delta, \tag{7}$$

где δ и *x_d* – приведенная погрешность измерения и верхний предел диапазона измерения средства измерения параметра.

Отметим, что между максимальным значением x_{\max} измеряемого параметра и верхним пределом x_d диапазона измерения средства измерения параметра действует соотношение $x_{\max} \leq x_d$. Для обобщения результатов анализа введем относительный верхний предел d_d диапазона измерения средства измерения:

$$d_{d} = \frac{x_{d} - x_{\max}}{x_{\max}}.$$
(8)

$$W_{3}(8): x_{d} = x_{\max}(1+d_{d}).$$
⁽⁹⁾

С учетом результатов [8, 2] анализа влияния распределения вдоль линии (1) регрессии результатов измерения x_i с относительной погрешностью измерения δ параметра x, анализ влияния параметров δ , d и d_d на R_{max} зависимости (1) для приведенной погрешности измерения δ проведем для 4 пар (рисунок 1*b*) значений (x_i , y_i):

$$x_{\min}, y_1; x_{\min}, y_2; x_{\max}, y_3; x_{\max}, y_4$$
 (10)

Правомерность использованной для анализа модели и ее достоинства для оценки предельно достижимого коэффициента корреляции $R_{\rm max}$ обоснованы в [8, 2]. Там показано, что среднее

отклонение ее «экспериментальных» точек (x_i, y_i) от линии регрессии (1) можно сопоставить со средним отклонением от нее точек (x_i, y_i) в реальном эксперименте. Например, если вероятность P(z) отклонения z результата каждого измерения y_i от действительного значения x_i физической величины подчиняются закону Гаусса со среднеквадратическим отклонением σ , то среднее отклонение результатов измерения физической величины от их истинных значений, составит $\approx 0,798\sigma$.



Рисунок 1 – Корреляционное поле результатов измерений $y_i(\blacklozenge)$ значений x_{\min} и x_{\max} физического параметра xпо рассматриваемой модели измерения для относительной [8] (*a*) и приведенной (*b*) погрешностей б измерения

Figure 1 – Correlation field of measurement results $y_i(\blacklozenge)$ of x_{\min} and x_{\max} values of physical parameter *x* according to the measurement model for the relative [8] (*a*) and reduced (*b*) measurement errors δ

Не нарушая общности рассмотрения, анализ влияния параметров δ , d и d_d на R корреляционного поля рисунка 1b проведем при $x_{max} = 1$ (нормируем все значения x_i величины x и результаты ее измерения y_i относительно величины x_{max}). Тогда, с учетом (1), (4), (7) и (9), получим для корреляционного анализа из (10) следующие четыре пары чисел:

$$(1-d), [1-d-(1+d_d)\delta]; (1-d), [1-d+(1+d_d)\delta];$$

$$(11)$$

$$(11)$$

Отметим, что здесь и далее коэффициенты корреляции R_{max} при разных δ , d и d_d рассчитаны для четырех пар чисел (11) по формуле (2) по процедуре программы «*Microsoft Excel*».

Результаты расчета

Результаты расчета R_{\max} при заданных δ , d и d_d представлены на рисунках 2 и 3.

Зависимости $R_{\max} = R_{\max}(d_d)$ при разных б и dприведены на рисунке 2. Их анализ и анализ результатов расчета значений $R_{\max}(d_d)$ при изменении б и d в более широких диапазонах показал, что при малых б ($\delta \le 0.05$) и больших d ($d \ge 0.8$) изменение d_d от 0 до 0.8 снижает R_{\max} менее, чем на 5 %. При увеличении б и уменьшении dпо мере возрастания d_d параметр R_{\max} резко снижается вплоть до значений, близких к 0.



Рисунок 2 – Зависимость максимального значения коэффициента корреляции R_{max} между результатами измерения физического параметра и его истинными значениями от относительного верхнего предела d_d диапазона измерения средства измерения: 1–3 – при значениях приведенной погрешности измерения δ , равной 0,05; 4–6 – при $\delta = 0,1$; 1, 4 – при значениях относительного диапазона d изменения параметра, равном 1; 2, 5 – при d = 0,6; 3, 6 – при d = 0,2

Figure 2 – Dependence of the maximum correlation coefficient R_{max} between the results of a physical parameter measurement and its true values on the relative upper limit d_d of the measurement range of the measuring instrument: 1–3 with the values of the reduced measurement error δ equal to 0.05; 4–6 – at δ = 0.1; 1, 4 – with the values of the relative range *d* of the parameter change, equal to 1; 2, 5 – at *d* = 0.6; 3, 6 – at *d* = 0.2

Отметим (рисунок 2), что для любых δ и dзависимость $R_{\max} = R_{\max}(d_d)$ имеет максимум при $d_d = 0$, т. е. когда верхний предел диапазона измерения измерительного прибора x_d соответствует максимуму измеряемого параметра x_{\max} . Значит, максимум R_{\max} коэффициента корреляции между результатами измерения и истинными значениями параметра R при заданных δ и d может быть рассчитан для 4 пар чисел (11) при $d_d = 0$:

$$\begin{array}{l} (1-d), \ (1-d-\delta); \ (1-d), \ (1-d+\delta); \\ 1, \ (1-\delta); \ 1, \ (1+\delta). \end{array}$$
 (12)

На рисунке 3 результаты расчета зависимостей $R_{\max} = R_{\max}(d)$ при разных значениях приведенной погрешности б сопоставлены с такими зависимостями для относительной погрешности б, полученными в [8]. Во введенных обозначениях четыре пары чисел, использованные для расчета зависимостей $R_{\max} = R_{\max}(d)$ при разных значениях относительной погрешности б, имеют вид:

$$(1-d), [(1-d)(1-\delta)]; (1-d), [(1-d)(1+\delta)];$$

1, $(1-\delta); 1, (1+\delta).$ (13)



Рисунок 3 – Зависимость максимального значения коэффициента корреляции $R_{\rm max}$ между результатами измерения физического параметра и его истинными значениями от относительного диапазона *d* изменения параметра: 1–4 – для относительной (1′ – 4′ – для приведенной) погрешности измерения δ , соответственно равной 0,01; 0,05; 0,1 и 0,2

Figure 3 – Dependence of the maximum value of the correlation coefficient R_{max} between the results of a physical parameter measurement and its true values on the relative range *d* of the parameter change: 1–4 – for relative (1' - 4' - for reduced) measurement error δ , respectively, equal to: 0.01; 0.05; 0.1 and 0.2

Анализ зависимостей, представленных рисунке 3, и более подробный их численный анализ показал, что коэффициент R_{max} , рассчитанный для приведенной погрешности измерения, всегда меньше R_{max} , рассчитанного для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d ($0,1 \le d \le 1$) относительная разница между величинами R_{max} , рассчитанными для приведенной и относительной погрешностей δ , не превышает 8,5 % (при $\delta \le 0,2$) и 2 % (при $\delta \le 0,05$).

Это позволяет использовать разработанную в [8] формулу (5) для зависимости $R_{\max} = R_{\max}(\delta, d)$ при $R_{\max} \ge 0,8$ как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения δ . В подтверждение этого в таблице для ряда значений δ и d результаты расчета R_{\max} по формуле (2) для относительной и приведенной (с использованием пар чисел (13) и (12) соответственно) погрешностей измерения сопоставлены с результатами расчета R_{\max} по формуле (5).

Анализ и пример использования полученных результатов

Анализ данных таблицы показывает, что точность оценки $R_{\rm max}$ по формуле (5) приемлема для проводимого анализа как для относительной, так и для приведенной погрешностей измерения при $R_{\rm max} \ge 0.8$. Следовательно, для оценки значения $\delta_{\rm min}$, при котором в известном диапазоне *d* изменения физической величины теоретически может быть достигнут уровень $R_{\rm max}$ тесноты связи между результатами ее измерения и истинными значениями, можно использовать полученную в [8, 2] из (5) формулу (6).

В качестве примера практического использования формулы (5) на рисунке 4, кривая 1, приведена рассчитанная по (5) зависимость достижимого уровня R_{max} тесноты связи между результатами измерения установкой УИМХ [9] и истинными значениями параметра H_c от диапазона его изменения d (в соответствии с [9] установка УИМХ при измерении H_c тороидальных образцов и образцов в форме сплошных и полых цилиндров аттестована с приведенной погрешностью $\delta = 2 \%$).

Для оценки величины d по $R_{_{\rm max}}$ и б из (5) получим для $R_{_{\rm max}} \ge 0.8$:

$$d \approx \left(\frac{0,866\delta^{1,82}}{1 - R_{\max}}\right)^{0,444}.$$
 (14)

Таблица/Table

Результаты расчета максимального значения коэффициента корреляции R_{\max} при разных погрешностях измерения б и относительных диапазонах *d* изменения параметра. Расчет по формуле (2): верхнее число в ячейке – для относительной, среднее число в ячейке (полужирным шрифтом) – для приведенной погрешности измерения б; курсив – расчет R_{\max} по формуле (5)

Results of calculation of maximum value of the correlation coefficient R_{max} at different measurement errors δ and relative ranges *d* of parameter change. Calculation according to (2): the top number in the cell is for relative, the average number in the cell (in bold) is for the reduced measurement error δ ; italics – compute of R_{max} using formula (5)

$\frac{d}{\delta}$	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1
0,01	0,9999	0,9998	0,9997	0,9995	0,9992	0,9959	0,9824
	0,9998	0,9997	0,9994	0,9992	0,9988	0,9950	0,9806
	<i>0,999</i> 8	0,9997	0,9994	<i>0,9991</i>	<i>0,9984</i>	<i>0,9926</i>	<i>0,9647</i>
0,02	0,9996	0,9994	0,9987	0,9980	0,9966	0,9840	0,9346
	0,9992	0,9988	0,9978	0,9968	0,9950	0,9806	0,9285
	<i>0,9993</i>	<i>0,9988</i>	<i>0,9978</i>	<i>0,9967</i>	<i>0,9945</i>	<i>0,9738</i>	<i>0,8754</i>
0,03	0,9991	0,9985	0,9971	0,9955	0,9924	0,9650	0,8685
	0,9982	0,9972	0,9950	0,9929	0,9889	0,9578	0,8575
	<i>0,9985</i>	<i>0,9976</i>	<i>0,9954</i>	<i>0,9930</i>	<i>0,9885</i>	<i>0,9452</i>	<i>0,7395</i>
0,05	0,9975	0,9960	0,9920	0,9877	0,9794	0,9110	0,7245
	0,9950	0,9923	0,9864	0,9806	0,9701	0,8944	0,7071
	<i>0,9963</i>	<i>0,9939</i>	<i>0,9883</i>	<i>0,9823</i>	<i>0,9708</i>	<i>0,8612</i>	<i>0,3398</i>
0,1	0,9901 0,9806 <i>0,9869</i>	0,9841 0,9701 <i>0,9783</i>	0,9693 0,9487 <i>0,9586</i>	0,9535 0,9285 <i>0,9376</i>	0,9245 0,8944 <i>0,8970</i>	0,7412 0,7071 <i>0,5100</i>	0,4652 0,4472
0,2	0,9623 0,9285 <i>0,9537</i>	0,9407 0,8944 <i>0,9236</i>	0,8917 0,8321 <i>0,8539</i>	0,8452 0,7809 <i>0,7799</i>	0,7715 0,7071 <i>0,6363</i>	0,4834 0,4472	0,2542 0,2425

Расчет по формуле (14) показывает, что при $\delta=0,02$ достижение значений $R_{\rm max} \geq 0,99$ возможно, если $d \ge 0,307$, а значений $R_{\text{max}} \ge 0,95$ если $d \ge 0,15$. Эти значения d приемлемы для использования результатов измерения установкой УИМХ параметра *H* для решения практических задач магнитной структуроскопии. Анализ проведен только на основании результатов метрологической аттестации установки УИМХ без экспериментальных исследований с ее использованием. Получить такие данные на основании методики расчета R с использованием (2) можно было бы только после трудоемкого экспериментального набора статистических данных с использованием наборов специально подготовленных и метрологически аттестованных образцов.

Но в [10] установкой УИМХ измерили и другие магнитные параметры инструментальных углеродистых сталей, в том числе: начальную и максимальную µ, магнитные проницаемости, напряженность намагничивающего поля, при котором достигается μ_m , релаксационную коэрцитивную силу и релаксационную намагниченность $M_{\rm Hr}$, остаточную намагниченность после снятия поля, равного Н_с, дифференциальную магнитную проницаемость в поле, равном H_e, максимальную дифференциальную магнитную проницаемость и др. На основании проведенных измерений, без учета их погрешностей, в [10] даны рекомендации о возможности использования указанных параметров для контроля режима термической обработки исследованных сталей.

Но методика измерения этих параметров не регламентирована ГОСТом¹, а погрешность измерения многократно превышает значение $\delta = 2\%$ [2].



Рисунок 4 – Зависимость достижимого уровня коэффициента корреляции R_{max} между результатами измерения магнитных параметров стальных образцов установкой УИМХ [9] и их истинными значениями от диапазона *d* изменения магнитных параметров: 1, 2, 3 – расчет по формуле (5) соответственно при $\delta = 0.02$; 0,05; 0,1

Figure 4 – The dependence of the achievable level of the correlation coefficient R_{max} of the closeness of the relationship between the results of measuring magnetic parameters of steel samples with the UIMH installation [9] and their true values from the range *d* of changing magnetic parameters: 1, 2, 3 – calculation according to $R_{\text{max}}(5)$, respectively, at $\delta = 0.02$; 0.05; 0.1

На рисунке 4 полученная зависимость $R_{max}(d)$ для параметра H_c (при $\delta = 2$ %) сопоставлена с зависимостью $R_{max}(d)$ для случаев $\delta = 5$ % и 10% (кривые 2 и 3). Расчет по формуле (14) показывает, что при $\delta = 0,05$ достижение значений $R_{max} \ge 0,99$ возможно, если $d \ge 0,644$, а значений $R_{max} \ge 0,95$ – если $d \ge 0,315$. При $\delta = 0,1$ достижение значений $R_{max} \ge 0,99$ невозможно, а значений $R_{max} \ge 0,95$ – возможно, если $d \ge 0,552$. Это необходимо учитывать при рекомендации тех или иных параметров для практического использования в магнитной структуроскопии.

Заключение

Максимальное значение коэффициента корреляции R_{max} между результатами измерения и истинными значениями физического параметра при прочих равных условиях имеет место тогда, когда верхний предел диапазона измерения измерительного прибора x_d соответствует максимальному значению измеряемого параметра x_{max} (относительный верхний предел диапазона d_d измерения средства измерения параметра равен нулю). При малых приведенных погрешностях измерения δ ($\delta \le 0,05$) и больших относительных диапазонах d изменения измеряемого параметра ($d \ge 0,8$) изменение d_d от 0 до 0,8 снижает R_{max} не более, чем на 5 %. При увеличении δ и уменьшении d по мере возрастания d_d величина R_{max} резко снижается до значений, близких к 0.

Максимальное значение коэффициента корреляции R_{\max} между результатами измерения и истинными значениями параметра, при прочих равных условиях ($d_d = 0, d$ и $\delta = \text{const}$), для приведенной погрешности измерения всегда меньше, чем для относительной погрешности измерения. Но в практически важном диапазоне изменения d ($0,1 \le d \le 1$) относительная разница между величинами R_{\max} для приведенной и относительной погрешностей δ не превышает 8,5 % при $\delta \le 0,2$ и 2 % при $\delta \le 0,05$.

Разработанная формула для оценки величины R_{max} по значениям δ и d диапазоне изменения $R_{\text{max}} \ge 0,8$ и полученная на ее основе формула для решения обратной задачи (оценки погрешности измерения δ_{\min} , при которой в известном диапазоне d изменения параметра теоретически достижим уровень R_{max} тесноты связи между результатами его измерения и истинными значениями) могут быть использованы как для относительной, так и для приведенной погрешностей δ измерения.

Полученные результаты могут быть использованы для магнитных измерений и измерений при неразрушающем контроле. Они позволят без проведения измерений, по приведенной или относительной погрешности измерения метрологически аттестованного средства измерения, определить максимально достижимый коэффициент корреляции между истинными значениями и результатами измерения параметра в известном диапазоне его изменения. Это позволит исследователям объективно сопоставить возможности разных методик и средств контроля, для получения приемлемого коэффициента корреляции между определяемой и измеряемой величинами не манипулировать результатами измерения, а снижать до приемлемых значений погрешность измерения используемого средства измерения, обоснованно заменить его на другое или измерять другой параметр, косвенно связанный с определяемым.

Список использованных источников

1. *Клюев, В.В.* Неразрушающий контроль. Справочник: в 8 т. / Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 6: в 3 книгах. Книга 1 // В.В. Клюев [и др.] – М. : Машиностроение, 2006. – 848 с.

2. *Клюев, В.В.* Анализ и синтез структурочувствительных магнитных параметров сталей / В.В. Клюев, С.Г. Сандомирский – М. : Издательский дом «СПЕКТР», 2017. – 248 с.

3. *Бида, Г.В.* Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей / Г.В. Бида, А.Н. Сташков // Дефектоскопия. – 2003. – № 4. – С. 67–74.

4. Костин, К.В. Выбор параметра и алгоритма магнитной твердометрии углеродистых термообработанных сталей методом регрессионного моделирования / К.В. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 3–11.

5. *Мельгуй, М.А.* Многопараметровые методы магнитной структуроскопии и приборы для их реализации (обзор). Ч. 2. Импульсный магнитный многопараметровый метод и прибор ИМА-М для его реализации / М.А. Мельгуй // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 11–26.

6. Костин, В.Н. Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция / В.Н. Костин, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2017. – № 7. – С. 23–34.

7. *Чернышев, Е.Т.* Магнитные измерения / Е.Т. Чернышев [и др.] – М. : Издательство стандартов, 1969. – 248 с.

8. *Сандомирский, С.Г.* Влияние точности измерения и диапазона изменения физической величины на коэффициент корреляции / С.Г. Сандомирский // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 13–17.

9. *Матюк, В.Ф.* Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий / В.Ф. Матюк, А.А. Осипов // Дефектоскопия. – 2007. – № 3. – С. 12–25.

10. *Матюк, В.Ф.* Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей / В.Ф. Матюк [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 2. – С. 25–49.

References

1. Kljuev V.V., Muzhickij V.F., Gorkunov Je.S., Shherbinin V.E. *Nerazrushajushhij kontrol'. Spravochnik* [Nondestructive testing. Directory: in 8 vol. / Edited by V.V. Klyuev. Vol. 6: in 3 books. Book 1]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 848 p.

2. Kljuev V.V., Sandomirski S.G. *Analiz i sintez strukturochuvstvitel'nykh magnitnykh parametrov stalej* [Analysis and synthesis of structure-sensitive magnetic parameters of steels]. Moscow: Izdatel'skij dom «SPEKTR», 2017, 248 p.

3. Bida G.V., Stashkov A.N. Multipurpose Use of Magnetic Properties of Steels in Nondestructive Testing of the Quality of Heat-Treated Workpieces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2003, vol. 39, iss. 4, pp. 310–316.

DOI: 10.1023/B:RUNT.0000009087.64604.82

4. Kostin K.V., Kostin V.N., Smorodinski Ya.G., Tsar'kova T.P., Somova V.M., Sazhina E.Yu. Choice of the Parameters and Algorithm for the Magnetic Hardness Testing of Thermally Treated Carbon Steels by the Method of Regression Modeling. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2011, vol. 47, iss. 2, pp. 89–95. **DOI:** 10.1134/S1061830911020094

5. Mel'gui M.A. Multiparameter Methods in Magnetic Structuroscopy and Instruments for Their Realization (Review): II. The Pulsed Magnetic Multiparameter Method and IMA-M Instrument for Its Performance. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, iss. 3, pp. 138–145.

DOI: 10.1134/S1061830915030055

6. Kostin V.N., Smorodinski Y.G. Multipurpose Software-Hardware Systems for Active Electromagnetic Testing as a Trend. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, iss. 7, pp. 493–504.

DOI: 10.1134/S1061830917070075

7. Chernyshev E.T, Chechurina E.N., Chernysheva N.G., Studencov N.V. *Magnitnye izmerenija* [Magnetic measurements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1969, 248 p.

8. Sandomirski S.G. Effect of Measurement Accuracy and Range of Variation of a Physical Quantity on the Correlation Coefficient. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, iss. 10, pp. 1113–1120.

DOI: 10.1007/s11018-015-0588-3

9. Matyuk V.F., Osipov A.A. A Setup for Measuring the Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Materials and Articles. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, vol. 43, iss. 3, pp. 143–153.

DOI: 10.1134/S1061830907030035

10. Matjuk V.F., Burak V.A., Korotkevich Z.M., Osipov A.A. [The effect of tempering and tempering temperatures on the structure and magnetic properties of tool carbon steels]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushhij kontrol'* [Technical diagnostics and nondestructive testing], 2012, no. 2, pp. 25–49 (in Russian).

УДК 621.791

Качество как субъективно измеряемая величина

П.С. Серенков, В.М. Романчак

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

Поступила 22.12.2018 Принята к печати 26.02.2019

Идентифицирована проблема обеспечения достоверности результатов измерений характеристик качества как субъективных величин и их корректного применения в логико-математических моделях принятия решений. Целью данной работы являлось повышение достоверности экспертного оценивания единичных характеристик качества процессов, продукции, систем.

Рассмотрены основные методологические подходы к субъективным измерениям, представленным классической, операциональной и репрезентативной теориями измерений. Наиболее приемлемой для целей обеспечения достоверности экспертного оценивания единичных характеристик качества определена репрезентативная теория, предполагающая, что измерить субъективную величину можно только в номинальной или порядковой шкалах. Установлено противоречие: возможности измерения единичных характеристик качества в порядковой шкале не соответствуют потребностям специалистов в области качества, использующих субъективные измерения для решения задач анализа и принятия решений, требующих применения логико-математических моделей; оценки должны быть выражены минимум в шкале интервалов. Обосновано наилучшее решение данной проблемы в использовании шкалы рейтингов, обладающей свойствами как порядковой, так и интервальной шкал.

В рамках проекта развития экспертных методов измерения качества сформулированы два фундаментальных элемента методологии субъективных измерений субъективных величин с позиций репрезентативной теории: 1) шкала рейтингов как модифицированная шкала рангов, 2) метод организации процесса измерения как метод альтернативного оценивания предпочтений эксперта.

Представлена аксиоматика шкалы рейтингов, обладающей свойствами как порядковой, так и интервальной шкал. Предложен алгоритм реализации метода альтернативного оценивания предпочтений эксперта, в основу которого положен специальный двухэтапный план альтернативного опроса эксперта и статистический критерий устойчивости предпочтений. В совокупности методология субъективных измерений субъективных величин обеспечивает корректность формирования шкалы рейтингов и преобразования значений характеристик качества в виде рейтингов в соответствующие значения величин, выраженных как минимум в шкале интервалов.

Ключевые слова: субъективные измерения, субъективные величины, шкала рейтингов, метод альтернатив.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110

Адрес для переписки:	Address for correspondence:	
П.С. Серенков	P.S. Serenkov	
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,	
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus	
e-mail: pavelserenkov@bntu.by	e-mail: pavelserenkov@bntu.by	
Для цитирования:	For citation:	_
П.С. Серенков, В.М. Романчак.	P.S. Serenkov, V.M. Romanchak.	
Качество как субъективно измеряемая величина.	[Quality as Subjectively Measured Value].	
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.	
2019. – T. 10, № 1. – C. 99–110.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 99–110 (in Russian).	
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110	

Quality as Subjectively Measured Value

P.S. Serenkov, V.M. Romanchak

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

Received 22.12.2018 Accepted for publication 26.02.2019

Abstract

The paper identifies the problem of ensuring the reliability of measurement results of quality characteristics as subjective values and their correct application in logical and mathematical models of making decisions. The purpose of this study is to increase the reliability of expert evaluation of individual characteristics of the quality of processes, products, systems.

The article describes basic methodological approaches to subjective measurements represented by the classical, operational and representational theories of measurement. The most acceptable for the purposes of ensuring the reliability of the expert evaluation of the single quality characteristics a representative theory, suggesting that the subjective value can be measured only in nominal or ordinal scales was determined. The contradiction is established: the possibility of measuring of single quality characteristics in the ordinal scale does not meet the needs of specialists in the field of quality, whouse subjective measurements to solve problems of analysis and decision-making, requiring the use of logical and mathematical models; in that way estimates should be expressed at least in the interval scale. The article substantiates the best solution of this problem by use of the rating scale which has properties of both ordinal and interval scales.

Within the framework of the expert methods of quality measurements development two fundamental elements of the methodology of subjective measurements of subjective values from the standpoint of representative theory are formulated: 1) the rating scale as a modified scale of ranks, 2) the method of organization of the measurement process as a method of alternative assessment of expert preferences.

Much attention is given to axiomatic of the rating scale having properties of both ordinal and interval scales. The algorithm of implementation of alternative assessment's of expert preferences method which is based on a special two-stage plan of alternative expert survey and statistical criterion of preferences' stability was suggested. In conjunction, the methodologies of subjective measurements of subjective values ensure the correctness of the rating scale's formation and conversion of the values of quality characteristics in the form of ratings in the corresponding values expressed at least in the scale of intervals.

Keywords: subjective measurements, subjective values, rating scale, method of alternatives.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
П.С. Серенков	P.S. Serenkov
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: pavelserenkov@bntu.by	e-mail: pavelserenkov@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
П.С. Серенков, В.М. Романчак.	P.S. Serenkov, V.M. Romanchak.
Качество как субъективно измеряемая величина.	[Quality as Subjectively Measured Value].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2019. – T. 10, № 1. – C. 99–110.	2019, vol. 10, no. 1, pp. 99–110 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110	DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-99-110

Введение

По определению, качество - это степень, с которой совокупность собственных характеристик продукции (услуги) удовлетворяет требованиям потребителя¹. Качество в данной интерпретации является комплексной оценкой - результатом комплексирования оценок единичных характеристик. Исследования в этом направлении направлены главным образом на разработку корректных моделей комплексирования. Например, квалиметрия, как научное направление, рассматривает главным образом задачи и развивает методы выбора и структурирования характеристик качества, а также модели их комплексирования [1]. В то же время методы измерений единичных характеристик рассматриваются как устоявшиеся и по умолчанию сводятся к двум базовым - балльные оценки и парные сравнения по методу Саати [2].

В данной статье мы рассмотрим проблему недостижения качества, связанную с недостоверностью измерения (оценивания) единичных характеристик.

Из определения качества следует, что «степень удовлетворенности» – очевидно субъективная оценка потребителя. Здесь кроется фатальная ошибка, свойственная подавляющему большинству методов измерения [3]. Даже если «совокупность собственных характеристик продукции» представлена физическими величинами, значения которых получены объективно в результате измерений (испытаний) с помощью технических средств, субъективное восприятие потребителем качества и объективное его значение связаны в общем случае нелинейно. Причем вид этой связи априори неизвестен и в каждом случае индивидуален.

Пример. По результатам маркетинговых исследований установлено, что повышение точности средства измерения в 1,2 раза по сравнению с базовым вариантом приведет к повышению спроса (показателя прогнозируемой удовлетворенности) потребителя на продукцию в 2,0 раза. В то же время повышение точности в 2,0 раза вызовет повышение спроса потребителя всего в 2,2 раза.

А между тем потребитель отдает предпочтение той продукции, у которой не технические (физические) характеристики выше, а субъективное восприятие этих характеристик. Следствием предпочтения является принятие решения о финансировании, приобретении, реструктуризации. Очевидны риски некорректного принятия решений на основе недостоверной информации.

Субъективные измерения часто относят к категории так называемых психофизических измерений [4–6]. Базовый случай – субъективное измерение нефизической величины – предмет рассмотрения в данной статье. Это наиболее распространенный случай для практики решения задач анализа и принятия решений в отношении качества. В то же время это наиболее проблемный случай с позиций достоверности результатов и общезначимости применяемых теоретических подходов, методов, инструментов. Целью данной работы являлось повышение достоверности экспертного оценивания единичных характеристик качества процессов, продукции, систем.

Анализ субъективных измерений нефизических величин

Анализ субъективных измерений нефизических величин проведем с позиций проблемы обеспечения достоверности результатов и их использования для решения задач анализа и принятия решений, требующих применения логико-математических моделей.

Современная практика измерений руководствуется тремя основными методологическими подходами, представленными классической, операциональной и репрезентативной теориями измерений.

Фундаментальные различия между теориями связаны с элементами системы измерений или шкалы измерений, типовая структура которой представлена на рисунке 1 [7, 8].

Классическая теория субъективных измерений прежде всего ассоциируется с Фехнером, который утверждал, что измерение является просто «оценкой количества». Единственным отношением объектов эмпирической системы является установление того, сколько раз единица количества того же сорта содержится в нем [4]. При этом результаты измерения всегда являются натуральными числами, из чего следует, что к ним может быть применима любая форма валидного числового вывода [9, 10]. Ограничения на использование алгебраических процедур в числовой системе, связанные с осмысленностью выводов

¹ ISO 9000:2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь»

по результатам измерений, не применимы. Т. е. для этой теории все измерения являются

фактически измерениями на одном и том же типе шкалы – шкалы отношений.

Эмпирическая система (объекты)	Функция отоб-	Числовая система
Empirical system (objects)	(система правил	Numerical system
Отношения между объектами задаются:	отображения свойств объек- тов числами)	Отношения между числами задаются:
 по известным фактам; 	Display	• аксиоматически;
• на основании эксперимента	function f	 без ограничений
Relations between objects:	(the system of rules for display- ing objects	Relations between numbers are set:
 by known facts; on the basis of experiment	properties by numbers)	axiomatically;without restrictions



Figure 1 – Measurement system as a scale

В настоящее время в субъективных измерениях классическая теория измерений практически целиком вытеснена репрезентативной и операциональной теориями.

Операциональная теория субъективных измерений ассоциируется с Бриджмэном [9, 10], который утверждал, что между эмпирической и числовой системами нет связи. С операциональной точки зрения измерение является просто операцией, которая порождает числа. Числа представляют собой нечто самодостаточное и независимое от представлений о шкалах.

Также как и классическая теория, операциональная теория измерений отвергает всяческие ограничения на использование алгебраических процедур в числовой системе в зависимости от типа шкалы. Это наиболее «либеральная» теория в части признания адекватности отношений объектов эмпирической системы результатам числовых преобразований, а также осмысленности выводов по результатам измерений. Наибольшее распространение теория получила в так называемых психофизических измерениях.

Репрезентативная теория субъективных измерений ассоциируется со Стивенсом [6–11], который сформулировал концепт осмысленности измерения и научного предположения. Суть концепта сводится к достаточно жесткой взаимосвязи отношений объектов эмпирической системы и алгебраических процедур в числовой системе, т. е. Стивенс рассматривает заслуживающее доверие измерение как приписывание чисел объектам по определенным правилам [7]. При этом различным правилам соответствуют различные типы шкал измерений.

Осмысленным высказыванием считается такое, в котором определенное им отношение отражает отношение в эмпирической структуре. Например, чтобы произведение двух чисел было осмысленным, должно существовать эмпирическое событие, которое соответствует этому произведению. Если такого события нет, произведение является бессмысленным по определению [8].

Для разработки теоретических подходов, методов, инструментов для измерения показателей качества, как субъективных величин, наиболее приемлема репрезентативная теория как наиболее консервативная в обеспечении достоверности и осмысленности результатов измерений, корректности научных предположений.

В настоящее время репрезентативная теория измерений в достаточной степени сформировалась, по крайней мере, в части общих представлений, подходов, методов, аксиоматики. Методически последовательно концепция репрезентативной теории измерений представлена Кноррингом [7]. Считается, что система измерений определена, если определены все три ее элемента (см. рисунок 1):

 – эмпирическая система (физические объекты, ощущения, суждения, отношения между которыми задаются аксиоматически); – числовая система, логико-математические отношения в которой задаются аксиоматически;

- функция f гомоморфного отображения эмпирической системы на числовую, причем такая, что по отношениям между числовыми образами можно судить об отношениях между реальными объектами. Иными словами, f – система правил, обеспечивающая адекватность отношений в эмпирической и числовой системах.

Система измерений формирует понятие шкалы измерений. Практикой установлено пять основных типов шкал, различающихся наборами отношений объектов в эмпирической системе. Более «сильные» шкалы передают большее число отношений в эмпирической системе, т. е. выше их степень информативности. Информативность в логико-математическом выражении удобнее определять функцией отображения f. С помощью функции отображения каждому *i*-му объекту эмпирической системы x_i приписывается число (числовой образ) $y_i = f(x_i)$. Физические и нефизические величины имеют принципиально различные способы отображения.

Для шкалы каждого типа существует своя группа допустимых преобразований (таблица 1).

Таблица 1/Table 1

Шкала Scale	Отношения объектов эмпирической системы Object relations of the empirical system	Функция отображения Display function	Реализации шка- лирования Implementation of scaling
Номинальная Nominal	Отношение эквивалент- ности Equivalence relation	Присвоение объектам индивидуальных имен (чисел) Assigning individual names (numbers) to objects	Идентификация, класси- фикация, кластеризация, перестановки Identification, clas- sification, clustering, permutations
Ранговая Rank	+ Отношение строгого порядка + Strict order relation	Ранжирование Ranking	Порядок следования Sequence
Интервальная Interval	 + Отношение эквивалент- ности интервалов + Equivalence of intervals relation 	Отображение с точ- ностью до линейного преобразования Displaying with accu- racy up to a linear transformation $y_i = ax_i + b$	Изменение размера еди- ницы, изменение (сдвиг) начала отсчета Changing of unit size, changing (shifting) of the reference point
Отношений (пропорциональная) Relations (proportional)	 + Отношение пропорциональности (эквивалентности отношений) + Proportionality relation (equivalence of relations) 	Отображение с точ- ностью до константы Displaying with accuracy up to constants $y_i = ax_i$	Изменение размера единицы, зафиксировано начало отсчета (имеется естественный нуль) Changing of unit size, fixed reference point (there is a natural zero)
Абсолютная Absolute	Все возможные отноше- ния All possible relations	Отображение как тождественное пре- образование Displaying as an equivalent transformation $y_i = x_i$,

Типы шкал и их характеристики Types of scales and their characteristics

Как следует из таблицы 1, последние три шкалы (интервальная, пропорциональная, абсолютная) предполагают наличие «единицы измерений» и функцию отображения *f*, выраженную в строгой линейной алгебраической форме, т. е. это информационно «сильные» шкалы, их еще называет метрическими. Метрические шкалы – инструмент объективных измерений.

Репрезентативная теория измерений предполагает, что измерить нефизическую величину можно только в номинальной или ранговой шкалах [11]. Низкая информативность порядковой шкалы (номинальную рассматривать далее не будем) обусловлена тем, что «единица измерения величины» отсутствует, строгие алгебраические операции недопустимы (см. таблицу 1). У нефизических величин, которые существуют только в сознании людей, нет размеров – поэтому их нельзя делить или вычитать [11]. Значение нефизической величины можно определить только косвенно.

Налицо противоречие: возможности числовой системы порядковой шкалы не соответствуют потребностям специалистов в области качества, использующих субъективные измерения для решения задач анализа и принятия решений. Т. е. при сборе первичной информации (опросе экспертов) регистрировать оценки (в числовой или иной форме) с приемлемой степенью достоверности возможно максимум в ранговой шкале. А для решения задач анализа и принятия решений, требующих применения логико-математических моделей, оценки должны быть выражены минимум в шкале интервалов.

Наилучшее решение данной проблемы заключается в использовании промежуточных шкал, обладающих свойствами как порядковой, так и интервальной шкал. Подобными свойствами обладают так называемые ассоциативные шкалы, наличие которых эмпирически обосновано в [3]. Ассоциативные шкалы на всем диапазоне измерений позиционируются как порядковые, но на малых участках (в пределах двух соседних рангов) обладают свойствами интервальных шкал. Для данного типа шкал исследуемое свойство объектов оценивается по некоторому другому свойству, измеряемому в метрический шкале. Допустимый вид функции отображения *f* в этих шкалах – дробно-линейные алгебраические преобразования.

Следует отметить, что задача формализации промежуточных шкал как полноценных систем измерений нефизических величин, обладающих свойством общезначимости, остается нерешенной до конца. В частности, по причине невозможности указать общий вид допустимых преобразований в аналитической форме.

Основы методологии субъективных измерений нефизических величин

В рамках проекта развития экспертных методов измерения качества нами предпринята попытка создания методологии субъективных измерений нефизических величин и представления их отношений в шкале интервалов, которая обеспечивает логико-математическую корректность алгоритма измерений и применяемых методов обработки и интерпретации информации, что, в конечном счете, позволяет говорить об общезначимости сформулированной системы измерений.

В основу методологии положены следующие фундаментальные элементы:

1. Промежуточная шкала, обладающая свойствами как неметрической (порядковой), так и метрической (интервальной) шкал. Отличительная особенность – шкала свойств объектов эмпирической системы представляет собой ранговую шкалу с дополнительными отношениями между объектами эмпирической системы, которую мы назвали рейтинговой. Рейтинг – более информативная оценка свойств объектов категории «ранг +».

2. Метод альтернативных форм как метод организации процесса субъективных измерений, с одной стороны, позволяющий корректно измерять объекты эмпирической системы в шкале рейтингов, с другой стороны, обеспечивающий надежность экспертных оценок.

3. Аксиоматика функции отображения, теоретически обосновывающая корректность преобразования отношений свойств объектов эмпирической системы, выраженных в рейтинговой шкале, в значения величин, характеризующих эти свойства, выраженные в метрической (интервальной) шкале. Аксиоматика обеспечивает свойство общезначимости методологии для широкого круга величин и решаемых задач.

Рейтинговая шкала свойств объектов эмпирической системы

В отличие от физических величин, измеряемых в метрических шкалах, для нефизических величин единственным достоверным способом измерения является оценка их проявления по шкале рангов [11]. Значения нефизической величины нельзя вычитать или делить [11]. Это означает, что способ измерения нефизической величины не определен, получить значение нефизической величины можно косвенно. Для этого, на наш взгляд, следует ввести понятие «последовательность одинаково отличающихся объектов». Это означает, что эксперт может построить или указать последовательность объектов, которые одинаково отличаются друг от друга. Этой потенциальной возможности эксперта есть многочисленные подтверждения [11, 12].

Будем считать, что если объекты кажутся эксперту одинаково отличающимися, то результат сравнения последовательных пар должен быть постоянной величиной.

Аксиоматически введем основные определения в отношении объектов ω_i , i = 1, 2, ..., n, оцениваемая характеристика качества которых x_j меняется равномерно в зависимости от порядкового номера объекта.

Определение 1. Если $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_i$ – последовательность одинаково отличающихся объектов, то результат сравнения последовательных пар объектов R(i, i+1) является постоянной величиной, R(i, i+1) = C, где C = const.

Определение 2. Если $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_i$ – последовательность одинаково отличающихся объектов, то порядковый номер *i* будем называть значением рейтинга.

Одинаково отличающиеся объекты могут служить опорными точками для оценки значения величины произвольного объекта.

Аксиоматика функции отображения

Очевидно, что для предложенной рейтинговой шкалы функция отображения также должна обладать специальной аксиоматикой в силу необходимости обеспечения адекватности преобразования оценок в виде рейтингов в значения величин, характеризующих отношения свойств объектов эмпирической системы, выраженные в интервальной шкале.

Приведем основные теоретические положения модели системы измерений субъективных величин последовательности одинаково отличающихся объектов как механизма преобразования измерительной информации. Критерий – общезначимость модели для широкого круга величин и решаемых задач. Определение 3. Из определения 1 следует, что разности или отношения значений величин x_i объектов ω_i постоянны, поэтому:

$$x_{i+1} - x_i = a, \tag{1}$$

или
$$\frac{x_{i+1}}{x_i} = b,$$
 (2)

i = 1, 2, 3, ...; a и b – некоторые постоянные.

Определение 4. Свойство результатов сравнения значений величин, определенное на множестве последовательных пар $(x_i; x_{i+1})$, можно продолжить естественным образом на множество произвольных пар $(x_i; x_i)$:

$$x_i - x_j = a (i - j), \tag{3}$$

или
$$\frac{x_i}{x_j} = b^{i-j}$$
. (4)

Определение 5. Результат сравнения одинаково отличающихся объектов R(i, j) – это числовая функция R(i, j), определенная на множестве пар (i, j), значение которой пропорционально разности рейтингов и не зависит от способа сравнения. Выражения (3) и (4) можно записать, используя функцию R(i, j):

$$R(i,j) = m(i-j), \tag{5}$$

где
$$R(i,j) = \begin{cases} x_i - x_j, \text{ или} \\ \ln(x_i) - \ln(x_j), x_i > 0, x_j > 0 \end{cases}$$
, (6)

где m – некоторое число, которое назовем масштабом шкалы; i и j – значения рейтинга.

Теперь мы можем сформулировать аксиому нефизического измерения ранжированных величин.

Аксиома 1. Результат сравнения R(i, j)для нефизической величины X не зависит от способа сравнения.

Аксиома 1 отражает особенность измерения нефизических величин. Нефизическая величина существует только в сознании людей. У нее нет измеряемых размеров и, соответственно, нельзя определить способ сравнения. Эксперт может только построить последовательность одинаково отличающихся объектов и определить ранг (рейтинг) объекта.

Аксиома 2. Значение измеряемой нефизической величины X зависит от способа измерения (сравнения).

Аксиома 2 отражает особенность неаддитивного измерения величины. Первичным для измерения нефизических величин является рейтинг, значения величины определяются на основании рейтинга. Тем самым мы отделяем процесс измерения от выбора шкалы измерения.

В качестве значения величины x_i объекта ω_i , i = 1, 2, ..., n, для случая неаддитивных величин можно, в конце концов, взять меру (рейтинг) объекта. Например, удобно принять, что R(i, i+1) = 1, i = 1, 2, 3, тогда R(i, j) = i-j; i, j = 1, 2, 3, ..., n. Однако, как значение характеристики качества, рейтинг – малоинформативная информация. Но это не единственный способ сравнивать значения величины.

Если эксперт правильно оценил рейтинг оцениваемой величины, то, выбрав способ сравнения (3) или (4), можно с помощью (6) найти значения величины X. Функция (6) соответствует двум различных способам сравнения значений величин. Причем значения величины X для первого и второго способа сравнения будут не совпадать. Такой результат эксперимента противоречит привычной точки зрения. Считается, что значения величины не должны зависеть от способа сравнения. Здесь нет логического противоречия, поскольку размер величины в данном случае – это следствие математической обработки. Это числа, которые исследователь для удобства приписывает объектам.

Поэтому нельзя утверждать, что выбран объективно «лучший» способ сравнения, можно говорить о том, что выбран субъективно более «удобный» способ.

Метод альтернативных форм как метод организации процесса субъективных измерений

Ключевым моментом методологии субъективных измерений нефизических величин выступает шкала рейтингов. Дополнительным свойством шкалы является равенство интервалов между двумя любыми соседними рейтингами. Очевидно, что рейтинговая шкала уникальна для каждого конкретного случая измерений величин *x*, объектов ω_i .

Для организации процесса измерений отношений объектов ω_i в виде оценок их рейтингов необходимо решить две задачи:

1. По предъявленному для измерений множеству объектов ω_i, обладающих величинами x_i, построить шкалу рейтингов (рангов с гарантированно одинаковыми расстояниями между соседними рангами). 2. Разработать методику измерения как экспертного оценивания неизвестной величины x_i объекта ω_i в виде рейтинга – числа, с помощью которого посредством функции отражения f будет в дальнейшем определена оценка значения величины x_i в шкале интервалов, пригодная для использования логико-математических моделей оценивания качества продукции, процессов, систем.

Дополнительно установлено, что в процессе субъективных измерений нефизических величин имеют место высокие риски получения недостоверной информации [12].

Решением поставленных задач является разработанный нами специальный метод организации процесса измерения – метод альтернативного оценивания предпочтений эксперта, основанный на методе оценивания разности. Мы будем называть его метод альтернатив [11, 12].

Приведем алгоритм реализации метода:

1. Формируем вербально цифровую шкалу парного оценивания предпочтительности объектов ω₁, ω₂, ..., ω_n между собой относительно присущих им неизвестных величин x₁, x₂, ..., x_n, в которой интервалы между показателями соседних уровней предпочтительности считаются одинаковыми.

Нами предлагается вариант половинного деления интервальной шкалы – обобщенная дихотомическая шкала сравнительной оценки предпочтительности двух объектов. Один из вариантов реализации шкалы – шкала Саати [2].

Число интервалов шкалы выбирается из ряда 1, 2¹, 2², 2³, ..., 2ⁿ. Преимущество такой шкалы состоит в адаптивном выборе количества уровней, исходя из сложности решаемой задачи и квалификации экспертов.

Интервальная шкала допускает положительные линейные преобразования: g(x) = ax + b(a > 0).

2. Объекты $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$ предварительно ранжируем по степени предпочтительности. Чтобы определить рейтинги объектов $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$, сравниваем их попарно в соответствии с двумя альтернативными планами проведения опроса эксперта. В соответствии с выбранной в п.1 шкалой определяем для каждого случая оценку предпочтительности объектов между собой как разность их рейтингов R(i, j).

План А – «каждый с одним». Оцениваются значения $R(p, j), j \neq p; j = 1, 2, ..., n$, при этом величины x_j объектов ω_j сравниваются с одной и той же величиной x_p объекта $\omega_p, p \in \{1, 2, ..., n\}$:

$$R(p,j) = x_p - x_j, j \neq p.$$
⁽⁷⁾

План В – «каждый с предыдущим». Оцениваются значения R(i, j), i = 1, 2, ..., n-1; j = i+1, при этом сравниваются последовательно пары идущих друг за другом величин x_i и x_{i+1} объектов ω_i и ω_{i+1} соответственно:

$$R(i, i+1) = x_i - x_{i+1}, i = 1, 2, ..., n-1.$$
(8)

3. На основании альтернативных форм (7) и (8) составляем соответствующие две альтернативные системы линейных уравнений:

$$R(p,j) = m(p-j) = r_{A,p} - r_{A,j}, j \neq p; j = 1, 2, ..., n;$$
(9)

$$R(i, i+1) = m(i - (i+1)) = r_{B,i} - r_{B,(i+1)},$$
(10)

 $i = 1, 2, ..., n-1; p \in \{1, 2, ..., n\},$

где *m* – масштаб шкалы; $r_{A,p}$, $r_{A,j}$ – оценки рейтингов объектов $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n$ из выражения (9); $r_{B,i}$, $r_{B,(i+1)}$ – альтернативные оценки рейтингов тех же объектов из выражения (10).

4. Решаем альтернативные системы уравнений (9) и (10) и для каждой находим соответственно альтернативные оценки рейтингов $r_{A,i}$ и $r_{B,i}$, i = 1, ..., n.

5. Сопоставляем альтернативные значения рейтингов $r_{A,i}$ и $r_{B,i}$, i = 1, ..., n и принимаем или отвергаем гипотезу о надежности измерения.

Для этого сформулируем эмпирический критерий K_1 надежности оценок рейтинга, используя альтернативные системы сбора данных.

Критерий K_1 . Оценки рейтинга надежны, если решения альтернативных систем (9) и (10) связаны статистически значимой, адекватной, возрастающей линейной зависимостью:

$$r_{B,i} = a_1 r_{A,i} + a_2 + \varepsilon, \tag{11}$$

где $i = 1, ..., n; a_1, a_2$ – неизвестные постоянные, $a_1 \neq 0; \epsilon$ – случайная ошибка с математическим ожиданием $E(\epsilon) = 0; r_{A,i}$ и $r_{B,i}$ – значения рейтинга (решение альтернативных систем уравнений (9) и (10)).

В качестве критерия линейности логично принять коэффициент детерминации регрессионной модели R^2 . Достаточно высокий коэффициент детерминации R^2 позволяет сделать вывод об устойчивости предпочтений экспертов и доверии к экспертным оценкам [12].

После проверки оценивания предпочтений экспертов по критерию K_1 в качестве верифицированных значений рейтингов r_i можно принять среднее значение из $r_{A,i}$ и $r_{B,i}$.

6. Используя значения рейтингов r_i теперь можно определить численные значения величин $x_1, x_2, ..., x_n$ объектов $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n$ в шкале интервалов.

В прикладных задачах оценки в шкале интервалов может быть не достаточно. В этом случае бывает целесообразно уровень информативности шкалы интервалов, в которой мы получили оценку величины, повысить до уровня шкалы отношений. Метод альтернатив позволяет это сделать корректно. Покажем это на примере.

Пример. Служба качества организации разрабатывает модель оценивания результативности системы менеджмента качества (СМК) вида:

$$Y = C_1 x + C_2 y + \dots + C_n z , \qquad (12)$$

где *Y* – оценка результативности СМК; *x*, *y*, ..., *z* – частные показатели результативности; *C_i* – коэффициенты весомости соответствующих частных показателей.

Показатель x – средний уровень компетентности персонала. Оцениванию качества подлежит множество однородных объектов ω_i (сотрудники организации $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_M$, обладающих характеристиками качества x_i соответственно $x_1, x_2, ..., x_M$). Очевидно, что x – субъективная величина, измеряемая субъективно (оцениваемая экспертно). Анализ требуемых возможных отношений объектов (компетентности сотрудников) предполагает, что оценка x должна быть определена в метрической шкале (как минимум в шкале интервалов), так как:

а) оценка *x* определяется как среднее арифметическое:

$$\overline{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1,M} x_i, \qquad (13)$$

где x_i – оценка компетентности конкретного сотрудника; M – число оцениваемых сотрудников;

б) оценка \bar{x} участвует в полиноминальной модели первого порядка (12).

Сформируем модель оценивания показателя x на основе метода альтернатив. Обозначим $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_6$ – группу из шести реальных сотрудников, компетентность которых необходимо оценить. Введем еще двух виртуальных сотрудников ω_0 и ω_7 причем таких, что ω_0 – сотрудник, компетентность которого x_0 соответствует минимально допустимым требованиям, ω_7 – сотрудник, компетентность которого x_7 полностью соответствует требованиям. Для попарного оценивания предпочтительности объектов $\omega_0, \omega_2, ..., \omega_7$ между собой
воспользуемся вербально цифровой шкалой парных сравнений аналогичной Саати [2].

Результаты реализации алгоритма метода альтернатив представлены в таблице 2, где $r_{A,i}$ – нормализованные значения рейтинга

для плана A; $r_{B,i}$ – нормализованные значения рейтинга для плана B; r_i – среднее значение рейтинга, рассчитанное по формуле:

$$r_i = (r_{A,i} + r_{B,i})/2.$$

Таблица 2/Table 2

Результаты оценивания рейтинга компетент	ности персонала
Results of the evaluation of the rating of staff con	mpetence

Результ методом	Результ значени					
Results of alterr	of the expert survey by the method Results natives the valu					
План A Plan A	$R(p, j) = x_p - x_i,$ $p = 7$	План <i>В</i> Plan <i>B</i>	$R(i+1, i) = x_{i+1} - x_i$	ω _i		
$x_7 - x_6$	0	$x_7 - x_6$	0	ω ₀		
$x_7 - x_5$	0	$x_{6} - x_{5}$	0	ω_1		
$x_7 - x_4$	1	$x_{5} - x_{4}$	1	ω ₂		
$x_7 - x_3$	2	$x_4 - x_3$	2	ω ₃		
$x_7 - x_2$	4	$x_3 - x_2$	3	ω ₄		
$x_7 - x_1$	7	$x_2 - x_1$	2	ω ₆		
$x_{7} - x_{0}$	8	$x_1 - x_0$	1	ω,		

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация критерия K_1 надежности оценок рейтинга методом альтернатив.



Рисунок 2 – Графическая интерпретация критерия K_1 надежности оценок рейтинга методом альтернатив (регрессия значений рейтингов r_{Bi} на r_{Ai})

Figure 2 – Graphical interpretation of the criterion K_1 of rating assessment reliability by the method of alternatives (regression of rating values r_{Bi} to r_{Ai})

Визуальный анализ графика показывает, что эмпирические данные (точки) сгруппированы вблизи линии регрессии $r_B = -0,0476 + 1,0249 r_A$, причем значения статистики Фишера (F(1,4) = 272,32) и *р*-уровня (p < 0,00001) подтверждают гипотезу об адекватности регрессионной

Результаты расчета рейтинга сотрудников и значений их компетентности								
Results of calculating the rating of employees and the values of their competence								
ω_{i}	r _{A,i}	$r_{B,i}$	r _i	x_{i}				
ω	0,00	0,00	0,00	4,0				
ω_1	0,13	0,11	0,12	4,7				
ω ₂	0,50	0,33	0,42	6,5				
ω3	0,75	0,67	0,71	8,3				
ω_4	0,88	0,89	0,88	9,3				
ω ₅	1,00	1,00	1,00	10,0				
ω ₆	1,00	1,00	1,00	10,0				
ω,	1,00	1,00	1,00	10,0				

модели. Кроме того коэффициент детерминации R^2 показывает, что на 97,4 % линейная регрессия объясняет зависимость между значениями рейтинга r_B и r_A . Делаем вывод, что измерение рейтинга достоверно, эксперт уверенно оценивал компетентность сотрудников.

Теперь мы можем рассчитать в шкале отношений значения величины «компетентность» для каждого сотрудника, выбрав удобный для восприятия человеком интервал значений. Пусть естественная оценка сотрудника, компетентность которого соответствует минимальным требованиям, выбрана четыре балла ($x_0 = 4$) и оценка сотрудника, компетентность которого полностью соответствует требованиям, выбрана десять баллов ($x_7 = 10$). Тогда значения величины x_i , рассчитываются по формуле:

$x_i = x_0 + (x_7 - x_0)r_i$.

Полученные значения величины x_i (см. таблицу 2) теперь можно использовать для субъективной характеристики уровня качества в задачах квалиметрии. Так мы можем рассчитать искомое среднее значение величины компетентности шести (M = 6) штатных сотрудников $\bar{x} = 8,1$, которое можно подставлять в модель (12).

Заключение

В рамках решения задачи обеспечения достоверности субъективных измерений нефизических величин приведен анализ современных теорий измерений. Сделан вывод о том, что для разработки теоретических подходов, методов, инструментов для измерения показателей качества, как субъективных величин, наиболее приемлема репрезентативная теория как наиболее консервативная в обеспечении достоверности и осмысленности результатов измерений, корректности научных предположений.

Идентифицировано основное противоречие существующих моделей систем измерений: эксперт способен регистрировать оценки характеристик качества с приемлемой степенью достоверности максимум в ранговой шкале, в то время, как для решения задач анализа и принятия решений оценки должны быть выражены минимум в шкале интервалов.

Обосновано решение данной проблемы за счет использования промежуточной шкалы – шкалы рейтингов, обладающей свойствами как порядковой, так и интервальной шкал.

Для организации процесса субъективных измерений, обеспечивающего измерения в шкале рейтингов предложен специальный метод альтернативных форм, основанный на методе оценивания разности и позволяющий корректно сформировать шкалу рейтингов, преобразовать их в соответствующие значения величин, выраженных в шкале интервалов.

Приведена аксиоматика системы измерений субъективных величин с применением шкалы рейтингов. Обеспечено свойство общезначимости методологии для широко круга величин и решаемых задач.

Список использованных источников

1. *Маругин, В.М.* Квалиметрический мониторинг строительных объектов / В.М. Маругин, Г.Г. Азгальдов. – СПб. : Политехника, 2011. – 345 с.

2. *Саати, Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1989. – 316 с.

3. *Пахомов, А.П.* Проблема осмысленности психологических измерений / А.П. Пахомов // Психологический журнал. – 2006. – Т. 27, № 5. – С. 75–82.

4. *Фёдоров, А.А.* Проблема измерения «психического» / А.А. Фёдоров // Перспективы психологической науки и практики: сборник статей Международной научно-практической конференции. – М. : ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». – 2017. – С. 157–159.

5. *Бугаев, Ю.В.* Состоятельность статистических оценок Терстоуна-Мостеллера / Ю.В. Бугаев [и др.] // Вестник ВГУИТ, 2015. – № 1. – С. 82–85. **DOI:** 10.20914/2310-1202-2015-1-82-85

6. *Носс, И.Н.* Введение в практику психологического эксперимента / И.Н. Носс. – М. : Пер Сэ, 2006. – 304 с.

7. *Кнорринг, В.Г.* Развитие репрезентативной теории измерений / В.Г. Кнорринг // Измерения, контроль, автоматизация: [сб. науч.-техн. обзоров]. – 1980. – № 11–12. – С. 3–10.

8. *Толстова, Ю.Н.* Краткая история развития репрезентативной теории измерений / Ю.Н. Толстова // Заводская лаборатория. – 1999. – № 3. – С. 49–57.

9. *Гусев, А.Н.* Психологические измерения. Теория. Методы / А.Н. Гусев, И.С. Уточкин. – М. : Аспект Пресс, 2011. – 317 с.

10. *Фер, Р.М.*Психометрика:Введение/Р. М. Фер, Берн Р. Бакарак; пер. с англ. А.С. Науменко, А.Ю. Попова; под ред. Н.А. Батурина, Е.В. Эйдмана. –2010. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. – 445 с.

11. *Романчак, В.М.* Субъективное оценивание вероятности / В.М. Романчак // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 74–82.

12. Серенков, П.С. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации / П.С. Серенков [и др.]. – Минск : Новое знание; М. :ИНФРА-М. – 2014. – 255 с.

References

1. Marugin V.M., Azgal'dov G.G. *Kvalimetricheskij monitoring stroitel'nykh ob'ektov* [Qualimetric monitoring of construction sites]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2010, 345 p.

2. Saati T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarkhij* [Decision Making. Method of the Analysis of Hierarchies]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1989, 316 p.

3. Pakhomov A.P. [The Problem of meaningfulness of psychological measurement]. *Psikhologicheskij zhurnal* [Psychological journal], 2006, vol. 27, no. 5, pp. 75–82 (in Russian).

4. Fedorov A.A. *Problema izmereniya «psikhicheskogo»* [The problem of measurement of «mental»]. Moscow: FGBOU VO, «Russian state University named after A.N. Kosygin», 2017, pp. 157–159 (in Russian).

5. Bugaev Y.V., Nikitin B.E., Shurupova I.J., Babayan M.K. [The Consistency of Statistical Estimates of Thurstone-Mosteller]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta inzhenernykh tekhnologij* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2015, no. 1, pp. 82–85 (in Russian).

DOI: 10.20914/2310-1202-2015-1-82-85

6. NOSS I.N. *Vvedenie v praktiku psikhologicheskogo ehksperimenta* [Introduction to the practice of psychological experiment]. Moscow, Per Se Publ., 2006, 304 p.

7. Knorring V.G. [The development of the representational theory of measurement]. *Izmerenija, kontrol', avtomatizacija: sb. nauch.-tehn. obzorov* [Measurement, control and automation: proceedings.-techne. reviews'], 1980, no. 11–12, pp. 3–10 (in Russian).

8. Tolstova Yu.N. [A brief history of the development of representative measurement theory]. *Zavodskaya laboratoriya* [Industrial laboratory], 1999, no. 3, pp. 49– 57 (in Russian).

9. Gusev A.N., Utochkin I.S. *Psikhologicheskie izmereniya. Teoriya. Metody* [Psychological Measurements. Theory. Methods]. Moscow, Aspekt Press Publ., 2011, 317 p.

10. Fer P.M., Bacharach B.R. *Psikhometrika. Vvedenie* [Psychometrics: an Introduction]. Chelyabinsk, Izdatel'skij centr JuUrGU Publ., 2010, 445 p.

11. Romanchak V.M. [The measurement of subjective probability]. *Informatika* [Informatics], 2018, vol. 15, no. 2, pp. 7–16 (in Russian).

12. Serenkov P.S., Gurevich V.L., Romanchak V.M., Yanushkevich A.V. *Metody menedzhmenta kachestva. Metodologiya upravleniya riskom standartizatsii* [Methods of quality management. The methodology of risk management standardization]. Minsk–Moscow, INFRA-M Publ., 2014, 255 p.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ от 28.02.2014 г. № 3

 Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. 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, jpg, разрешение не менее 300 dpi). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «*a*», «*b*» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете.

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 (grad, div, ln, min, max и др.), символы химических элементов (в т.ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверху не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора **DOI**, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи. 1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page. 10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be taped in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.



