ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 8	Nº 1	2017
		— • · · ·

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

СЕКРЕТАРЬ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

Виба Я., д.т.н., профессор, директор Института механики Рижского технического университета (г. Рига, Латвия) Гринчук А.П., к.т.н., доцент, старший научный сотрудник Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, советник Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптикомеханического 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 диссертацонных исследований; научное направление: «Средства и методы измерений, контроля, диагностики и оценки качеиства объектов и процессов» (технические и физико-математические науки) ISSN 2220-9506

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

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

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

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

Подписано в печать 22.02.2017. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

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

Дата выхода в свет 07.03.2017. Заказ № 135.

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет

пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь,

тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94

e-mail: pimi@bntu.by

http://pimi.bntu.by

© «Приборы и методы измерений», 2017

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 8 № 1 2017	Volume 8	Nº 1	2017
-------------------	----------	------	------

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

SECRETARY

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

Algimantas Bubulis, Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania) Arvid A. Vain, Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nikalai A. Kuharenko, General Director of Minsk Scientific and Research Istrumentation Engineering Institute (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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ADDRESS:

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

© «Devices and Methods of Measurements», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.	
Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных	
датчиков температуры газов	7
Кицак А.И., Лущик А.П., Есипович Д.Л., Конон В.Н., Кавальчук И.В., Протасевич О.А., Третьяк И.Б.	
Конструкция и алгоритм работы лазерного комбинированного пожарного извещателя	15
Комар Д.И., Кутень С.А.	
Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические характеристики	
поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140	23
Чернышев А.В.	
Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного образца на	
фазу вносимой электродвижущей силы накладного преобразователя вихретокового	
толщиномера	32
Сотский Н.Б.	
Классификации технических средств физической культуры и оценка их	
эффективности на основе биомеханических принципов построения двигательных действий	40
Методы измерений, контроля, диагностики	
Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В. Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов	49

Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. Refractive index determination for a plane dielectric layer using the measurements of transmitted beam intensity	55
Тявловский А.К., Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Мухуров Н.И., Шаронов Г.В., Пантелеев К.В.	
Анализ дефектов поверхности исходных подложек алюминия и его сплавов методом сканирующего зонда Кельвина	61
Титович Е.В., Потепалов П.О., Петкевич М.Н., Киселев М.Г.	
Алгоритм определения компонентов сеанса лучевой терапии для различных методов	
облучения онкологических пациентов на этапе их предлучевой подготовки	73
Скалабан А.В., Юрик И.В., Лазарев В.С.	
Библиометрическое исследование публикаций работников Белорусского национального	
технического университета с помощью баз данных Web of Science и Scopus и оценка	
эффективности их научной деятельности: 2011–2015 гг	81

CONTENTS

Measuring instruments

Sabitov A.F., Safina I.A. Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors	7
Kitsak A.I., Lushchyk A.P., Esipovich D.L., Konon V.N., Kavalchyk I.V., Protasevich O.A., Tretyak I.B. Construction and the algorithm operation of the laser combined fire detector	15
Komar D., Kutsen S. Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics of AT140 Neutron Calibration Facility	23
<i>Chernyshev A.V.</i> Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer sample on of phase introduced electromotive force of superimposed transducer of eddy current thickness meter	32
Sotsky M.B. Classifications of technical means of physical training and assessment of their effectiveness based on biomechanical principles of structuring motor actions	40

Methods of measurements, monitoring, diagnostics

Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.	
Method for determination of focal plane location of focusing components	49
Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.	
Refractive index determination for a plane dielectric layer using the measurements of transmitted	
beam intensity	55
Tyavlovsky A.K., Zharin A.L., Gusev O.K., Varabei R.I., Muhurov N.I., Sharonov G.V., Pantsialeyeu K.U.	
Analysis of surface defects of aluminum and its alloys with a scanning Kelvin probe	61
Titovich E.V., Patsiapalau P.A., Piatkevich M.N., Kiselev M.G.	
The algorithm for determining of timing of radiotherapy session components for different	
methods of oncology patients irradiation at the stage of radiotherapy planning	73
Skalaban A., Yurik I., Lazarev V.	
Bibliometric study of publications of employees of the Belarusian National Technical University	
fulfilled with the use of the Web of Science and Scopus databases and evaluation	
of the efficiency of their research activities: 2011–2015	81

УДК 536.51:681.5.015.3

Идентификация номинальных динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов

Сабитов А.Ф., Сафина И.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Россия Поступила 09.11.2016

Принята к печати 01.02.2017

Для эффективной работы каналов регулирования температуры в системе автоматического управления работой авиационных газотурбинных двигателей необходимо настраивать устройства коррекции на номинальные динамические характеристики применяемых датчиков температуры газов с целью оптимального снижения их тепловой инерционности. Существующие методы и средства позволяют определять динамические характеристики только конкретных экземпляров датчиков температур или средние динамические характеристики по результатам испытаний ограниченного числа датчиков конкретного типа в воздушных потоках на аттестованных воздушных установках. Режимы эксплуатации авиационных датчиков температуры газов существенно отличаются от условий испытаний на воздушных установках, поэтому и динамические характеристики датчиков температуры в реальных условиях также будут существенно отличаться от полученных в результате испытаний. Целью работы являлась разработка методики пересчета результатов испытаний ограниченного числа датчиков температуры в воздушных аттестованных установках на номинальные динамические характеристики датчиков температур в воздушных аттестованных установках на номинальные динамические характеристики датчиков температур в объты являлась разработка методики пересчета результатов испытаний ограниченного числа датчиков температур в оздушных аттестованных установках на номи-

Предложен алгоритм идентификации номинальных динамических характеристик датчиков, предназначенных для измерения температуры газов в авиационных газотурбинных двигателях. Алгоритм предусматривает регистрацию переходных характеристик отдельных экземпляров датчиков конкретного типа на аттестованных воздушных установках при заданных скоростях воздушного потока, вычисление коэффициентов теплообмена датчика с воздушным потоком при каждой скорости воздушного потока, определение средних переходных характеристик датчиков при каждой скорости воздушного потока, определение постоянных времени выбранной динамической модели датчика по средним переходным характеристикам датчиков и установление параметров гиперболической зависимости номинальных значений постоянных времени выбранной модели датчика от коэффициента теплообмена. В соответствии с ожидаемыми условиями эксплуатации датчиков вычисляют ожидаемый коэффициент теплообмена, с помощью которого по гиперболической зависимости определяют ожидаемые динамические характеристики датчиков конкретного типа.

Методика апробирована с использованием результатов испытаний опытных датчиков температуры газов на аттестованной воздушной установке. Установлены параметры гиперболических зависимостей номинальных значений постоянных времени для динамической модели второго порядка опытных датчиков. Установленные гиперболические зависимости охватывают как режимы испытаний опытных датчиков, так и ожидаемые условия их эксплуатации.

Разработанная методика позволяет прогнозировать номинальные динамические характеристики датчиков температуры газов конкретных типов в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушном потоке на аттестованных установках.

Ключевые слова: идентификация, динамические характеристики, номинальные характеристики, датчики температуры газов.

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

Адрес для переписки: Сабитов А.Ф. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, г. Казань 420111, Россия e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru	Address for correspondence: Sabitov A.F. A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University K. Marx str., 10, Kazan 420111, Tatarstan, Russia e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Сабитов А.Ф., Сафина И.А.	Sabitov A.F., Safina I.A.
Идентификация номинальных динамических характеристик авиаци-	[Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas
онныхдатчиков температуры газов.	temperature sensors].
Приборы и методы измерений.	<i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements].
2017. – Т. 8, № 1. – С. 7–14.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-7-14

Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors

Sabitov A.F., Safina I.A.

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

Received 09.11.2016 Accepted for publication 01.02.2017

Abstract

The existing methods only allowed to determine the dynamic or average characteristics of specific copies of gas temperature sensors as the airflow test results of a limited number of specific copies of gas temperature sensors were carried out on a certified airflow equipment. The actual operating conditions of aircraft gas temperature sensors significantly differ from those at airflow equipment. The aim of the study was to develop methods of recalculation of a test results of a limited number of gas temperature sensors that were received at certified airflow equipment and to get nominal dynamic characteristics of a particular type of gas temperature sensors in the anticipated operating conditions.

This study offers the algorithm for the identification of the nominal dynamic characteristics of gas temperature sensors that are used to measure the temperature of gases in aircraft gas turbine engines. The algorithm makes it possible to 1) register the transient characteristics of gas temperature sensors of a particular type at a predetermined rate of air flow, 2) calculate the heat transfer coefficient between the gas temperature sensors and the air flow at each airflow rate, 3) measure the average transient characteristics of the gas temperature sensors at each airflow rate, 4) set the parameters of the hyperbolic function of the nominal variables of the time constants of selected gas temperature sensors from the heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient is calculated based on the expected operating conditions of the gas temperature sensors.

The result of the study was that the parameters of the hyperbolic function of the nominal variables of the time constants for the dynamic model of the second order gas temperature sensors were found. The developed method makes it possible to predict the dynamic performance of the specific types of gas temperature sensors in the expected operating conditions.

Keywords: identification, dynamic behavior, nominal characteristics, gas temperature sensors.

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

Address for correspondence:
Sabitov A.F.
A.N. Tupolev Kazan National Research Technical University
K. Marx str., 10, Kazan 420111, Tatarstan, Russia
e-mail: alfir-sabitov@yandex.ru
For citation:
Sabitov A.F., Safina I.A.
Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas
Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors].
Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors]. <i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements].
Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of nominal dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors]. <i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements]. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 7–14(in Russian).

Введение

Современные летательные аппараты оснащены системами автоматического управления газотурбинными двигателями, содержащими каналы регулирования температуры газов перед турбиной, за турбиной или в форсажной камере при ее наличии. Первичными измерительными преобразователями температуры газов в этих каналах являются, как правило, термоэлектрические преобразователи (термопары), обладающие достаточно большой тепловой инерционностью. Для снижения их тепловой инерционности каналы регулирования температуры содержат устройства коррекции динамических характеристик применяемых типов датчиков температуры газов (ДТГ), настраиваемые на номинальные значения постоянных времени установленных передаточных функций ДТГ конкретного типа.

В соответствии с отраслевым стандартом¹ передаточные функции ДТГ, предназначенные для измерения температуры газовых и воздушных потоков в системах летательных аппаратов и силовых установок, в зависимости от точности описания их динамических свойств в нормативной документации должны быть представлены в виде:

$$W(p) = \frac{\prod_{j=1}^{l-1} (E_j p + 1)}{\prod_{i=1}^{l} (T_i p + 1)},$$
(1)

где l = 1, 2, 3 – номер принятой математической модели датчика; T_i и E_j – постоянные времени соответствующей математической модели.

Если определены номинальные динамические характеристики ДТГ конкретного типа, то они снабжаются индексами *sf*.

Передаточные функции вида (1) конкретных экземпляров ДТГ определяются экспериментально на аттестованных воздушных установках, к примеру, типа УВ-010 [1], по их переходным характеристикам охлаждения в воздушном потоке известной скорости. Из числа зарубежных воздушных испытательных установок известна аналогичная воздушная многофункциональная исследовательская установка *Flow Test Facilities*, находящаяся в распоряжении *Rosemount Engineering Company* [2]. Имеются сведения, что во Франции на фирме *S.A. Auxitrol* также создана аэродинамическая установка для определения динамических характеристик авиационных датчиков газовых потоков.

Проблема заключается в том, что для установления номинальных значений постоянных времени в выбранной математической модели (1) по результатам испытаний отдельных экземпляров ДТГ конкретного типа не существует общепризнанной методики. Такая методика должна была бы решить, каким образом по результатам испытаний на аттестованных воздушных установках ограниченного числа датчиков устанавливать номинальные значения постоянных времени выбранной динамической модели ДТГ конкретного типа, которые соответствуют:

a) режимам испытаний на данной воздушной установке;

в) ожидаемым режимам эксплуатации в авиационных ДТГ.

Новизной работы является предложение методики установления номинальных значений постоянных времени выбранной динамической модели ДТГ конкретного типа по результатам испытаний на аттестованных воздушных установках ограниченного числа датчиков.

На существующих испытательных воздушных установках скорость воздушного потока не превышает 300 м/с при статическом давлении близком к атмосферному и температуре 20–25 °С. Авиационные же ДТГ эксплуатируются в газовом потоке, являющимся продуктами сгорания керосина в воздухе, с температурой до 1300 °С и статическим давлением порядка 1 МПа. Поэтому, очевидно, задача пересчета результатов определения динамических характеристик ДТГ, полученных на воздушных установках, на динамические характеристики в ожидаемых условиях эксплуатации является достаточно актуальной.

В руководящем техническом материале авиационной техники² приводится следующая формула пересчета показателя тепловой инерции термометра при скорости и статическом давлении, отличных от скорости V_0 и статического давления $p_{0\,{\rm CT}}$ при испытаниях на воздушных установках:

$$\xi_1 = \xi_0 \left[(V_1 p_{1 \text{ CT}}) / (V_0 p_{0 \text{ CT}}) \right]^{-Z}, [c]$$
(2)

где ξ_1 – показатель тепловой инерции термометра при скорости V_1 и статическом давлении $p_{0 \text{ cr}}$;

¹ОСТ 1 00418-81. Метод и средства определения динамических характеристик датчиков температур газовых потоков.

²РТМ 1595-79. Измерение нестационарной температуры воздушного потока при стендовых испытаниях ГТД. Термометры.

z – эмпирический коэффициент, устанавливаемый для каждого типа термометра.

В работе [3] приводится иная зависимость постоянной времени $T_{\rm T}$ датчика температуры в виде термопары от изменения расхода обтекающего ее газа G_{o} :

$$T_{\rm T} = T_{\rm TP} (G_{\rm gP} / G_{\rm g})^{0.5}, \tag{3}$$

где $T_{\rm TP}$ и $G_{\rm sp}$ – расчетные значения.

Из формул (2) и (3) видно, что они не учитывают температуру воздушного или газового потоков и применимы только для определения показателя тепловой инерции ДТГ, а не постоянных времени математических моделей вида (1) при $l \ge 2$.

Испытаниям на воздушных установках, подобных установке типа УВ-010, подвергается, как правило, ограниченное число опытных или вновь разрабатываемых ДТГ, по результатам которых требуется сделать вывод о номинальных динамических характеристиках ДТГ конкретного типа, соответствующих как испытательным режимам, так и ожидаемым условиям эксплуатации.

Известные методы статистической обработки результатов однократных или многократных испытаний отдельных изделий в выборке при равноточных измерениях позволяют находить только среднее арифметическое значение измеряемой величины из п единичных результатов. При этом среднее арифметическое значение лишь приближается к номинальному значению при $n \to \infty$, а разница между полученным средним арифметическим значением и номинальным зависит от числа *n* и оценивается доверительной вероятностью.

В отечественных и зарубежных источниках не обнаружены методы определения номинальных динамических характеристик авиационных ДТГ как по результатам испытаний в воздушных установках, так и для ожидаемых условиях эксплуатации.

Целью данной работы являлась разработка методики определения номинальных динамических характеристик авиационных ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушных установках.

Основная часть

Известно, что динамические характеристики контактных датчиков температур зависят от условий теплообмена с измеряемой средой. Так, например, в [4, с. 46] есть информация о гиперболической зависимости показателя тепловой инерции ε_{0,63} простейшего термоприемника от коэффициента теплообмена α с внешней (измеряемой) средой и использовании понятия характеристической кривой термической инерции. Характеристическую кривую показателя тепловой инерции тел или системы тел, по виду напоминающей гиперболу, в [4, с. 46] предложено описывать следующим выражением:

$$\varepsilon_{0,63} = \frac{C_{\Sigma}}{\alpha \ S} \cdot \frac{1}{\Psi_1},\tag{4}$$

где $\varepsilon_{0,63}$ – показатель тепловой инерции тела или системы тел, с; C_{Σ} – теплоемкость системы, равная сумме теплоемкостей всех тел, входящих в систему, Дж/К; *S* – площадь поверхности теплообмена системы со средой, м²; Ψ_1 – критерий, характеризующий неравномерность распределения температур в теле (в системе тел).

В работе [4, с. 47] также отмечается, что гиперболической зависимости (4) одной из асимптот соответствует координатная ось $\varepsilon_{0,63}$, а другой – параллельная координатной оси α прямая $\varepsilon_{0,63} = \varepsilon_{0,63\infty}$, где $\varepsilon_{0,63\infty}$ – минимальное значение показателя тепловой инерции при $\alpha \rightarrow \infty$.

С учетом последнего замечания выражение (4) принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{0,63} = \frac{1}{\alpha \Psi} + \varepsilon_{0,63\infty},\tag{5}$$

где Ψ – некоторый постоянный коэффициент для простейшего термоприемника, находящегося в стадии регулярного режима, при α = const и постоянной температуре измеряемой среды.

Простейшему термоприемнику соответствует передаточная функция вида (1) при l = 1, в которой к постоянной времени $T_1 = \varepsilon_{0,63}$ может быть применено выражение (5). Однако в литературе не обнаружено сведений о зависимостях всех постоянных времени T_i и E_j , входящих в передаточную функцию вида (1), от условий теплообмена для математических моделей ДТГ с $l \ge 2$.

Поскольку для использования в системах автоматического управления авиационных ДТГ необходимо знание номинальных динамических характеристик применяемых типов ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации, одним из направлений их прогнозирования может стать предположение, что все постоянные времени, входящие в математическую модель (1), подчиняются выражениям вида (5) и могут быть приняты за номинальные значения. При этом задача сводится к установлению по результатам испытаний ограниченного числа отдельных экземпляров датчиков конкретного типа соответствующих коэффициентов и минимальных значений постоянных времени в выражениях:

$$T_{isf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Psi_{T_i}} + T_{i\infty}; \qquad E_{jsf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \Psi_{E_j}} + E_{j\infty}.$$
 (6)

Предлагаемый алгоритм идентификации номинальных динамических характеристик ДТГ конкретного типа изображен на рисунке 1 в виде блок-схемы.

Реализация предлагаемого алгоритма производится в следующей последовательности.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма идентификации номинальных динамических характеристик датчиков температуры газов

Figure 1 – The flowchart identifying nominal dynamic characteristics gas temperature sensors

1. Формируется выборка их *n* образцов ДТГ конкретного типа. Объем выборки определяется имеющимся числом образцов ДТГ или устанавливается по заданной доверительной вероятности и допускаемой относительной погрешности определения искомых постоянных времени.

2. На аттестованной воздушной установке, например типа УВ-010 [1], с каждого экземпляра ДТГ регистрируется переходная характеристика при заданных скоростях V_1, \ldots, V_k воздушного потока. Число значений скорости k желательно иметь не менее трех в диапазоне от 50 до 300 м/с.

4. Вычисляют коэффициенты теплообмена α₁, ..., α_k чувствительного элемента ДТГ с воздушным потоком при каждой скорости воздушного потока.

5. Определяют средние переходные характеристики $\bar{h}(\tau)_{V_1}, ..., \bar{h}(\tau)_{V_k}$ из переходных характеристик образцов ДТГ, зарегистрированных при одинаковой скорости воздушного потока. Если переходные характеристики образцов ДТГ представлены в виде дискретных отсчетов в определенные моменты времени переходного процесса, то значения средних переходных характеристик при одинаковой скорости воздушного потока в те же моменты времени определяются по формулам:

$$\begin{split} \overline{h}(\tau_{1})_{V_{m}} &= \frac{\sum_{\nu=1}^{n} h_{\nu}(\tau_{1})_{V_{m}}}{n} :\\ \overline{h}(\tau_{2})_{V_{m}} &= \frac{\sum_{\nu=1}^{n} h_{\nu}(\tau_{2})_{V_{m}}}{n} :\\ \dots \\ \overline{h}(\tau_{\mu})_{V_{m}} &= \frac{\sum_{\nu=1}^{n} h_{\nu}(\tau_{\mu})_{V_{m}}}{n}, \end{split}$$

где $\tau_1, \tau_2, ..., \tau_{\mu}$ – моменты времени регистрации переходных характеристик образцов ДТГ; m = 1, 2, ..., k – номер скорости воздушного потока.

6. Используя какой-либо известный метод, например [5–8], определяют постоянные времени \overline{T}_i и \overline{E}_j выбранной динамической модели ДТГ по средним переходным характеристикам, соответствующим заданным скоростям воздушного потока.

7. С помощью регрессионного анализа проводят установление значений параметров $\Psi_{T,} \Psi_{E,}$, $T_{i\infty}$, $E_{i\infty}$, гиперболической зависимости вида (6) номинальных значений постоянных времени выбранной модели ДТГ от коэффициента теплообмена α , используя полученные в п. 6 постоянные времени $\overline{T_i}$ и $\overline{E_j}$ и соответствующие им коэффициенты теплообмена $\alpha_1, \ldots, \alpha_k$.



Рисунок 2 – Характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного датчика температуры газов: $\times -\overline{T_1}$; • $-\overline{E}$; $\Box -\overline{T_2}$; • – номинальные значения постоянных времени при ожидаемом коэффициенте теплообмена α_{ow}

Figure 2 – Characteristic curves of nominal time constants experienced gas temperature sensor (model 2): × – $\overline{T_1}$; • – \overline{E} ; \square – $\overline{T_2}$; \blacktriangle – nominal values of the time constants at the expected heat exchange coefficient α_{ox}

8. На основании ожидаемых условий эксплуатации определяют ожидаемые коэффициенты теплообмена α_{ож} чувствительного элемента ДТГ с газовым потоком.

9. По установленным гиперболическим зависимостям определяют номинальные значения постоянных времени T_{isf} и E_{isf} выбранной модели ДТГ в ожидаемых условиях эксплуатации.

Предлагаемый алгоритм был использован для прогнозирования динамических характеристик некоторого опытного ДТГ термоэлектрического типа. Экспериментальные переходные характеристики с каждого образца регистрировались на аттестованной установке воздушной при скоростях воздушного потока 94, 130 и 150 м/с.

В таблице 1 приведены полученные при трех скоростях воздушного потока из средних переходных характеристик значения постоянных времени модели 2 опытного ДТГ и соответствующие указанным скоростям коэффициенты теплообмена. Постоянные времени определены с применением спектрального анализа, опубликованного в работах [9, 10].

Таблииа 1 / Table 1

Постоянные времени опытного датчика температуры газов для модели 2

The values of the time constants of the model 2 experienced gas temperature sensors

k	\overline{T}_1, c	$\overline{T}_2, \mathbf{c}$	\overline{E}, \mathbf{c}	<i>V</i> , м/с	α, Вт/(м² К)
1	4,827	1,726	3,812	94	803,5
2	4,273	1,573	3,539	130	975,8
3	4,226	1,476	3,543	150	1 063,8

На рисунке 2 изображены полученные по предлагаемой методике характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного ДТГ и значения постоянных времени, соответствующие таблице 1.

Установленные гиперболические зависимости, описывающие характеристические кривые номинальных постоянных времени модели 2 опытного ДТГ, имеют вид:

$$T_{1sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,000666} + 2,825071, [c]$$
$$T_{2sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,000666} + 0,774012, [c]$$

$$_{sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,001305} + 0,774012$$

$$E_{sf}(\alpha) = \frac{1}{\alpha \cdot 0,001178} + 2,720597 \cdot [c]$$

В таблице 2 приведены полученные по установленным гиперболическим зависимостям результирующие номинальные значения постоянных времени модели 2 опытного ДТГ при трех скоростях воздушного потока и соответствующих им коэффициентах теплообмена.

Таблица 2 / Table 2

Значения номинальных постоянных времени для модели 2 опытного датчика температуры газов

The values of the nominal time constants experienced gas temperature sensor (model 2)

k	\overline{T}_{1sf}, c	$\overline{T}_{_{2sf}}, \mathbf{c}$	\overline{E}_{sf}, c	<i>V</i> , м/с	α, Вт/(м² К)
1	4,693	1,727	3,777	94	803,5
2	4,363	1,559	3,590	130	975,8
3	4,236	1,494	3,518	150	1 063,8

В качестве ожидаемых условий эксплуатации опытного ДТГ выбран режим измерения температуры газового потока, являющегося продуктом сгорания керосина в атмосферном воздухе с коэффициентом избытка окислителя $\alpha_{or} = 5$ при абсолютном давлении 0,53 МПа, температуре 1233 К и скорости 240 м/с. Ожидаемый коэффициент теплообмена газового потока с чувствительным элементом составил по расчетам $\alpha_{_{\rm OW}} = 2836$ Вт/(м² К), что дало по характеристическим кривым следующие ожидаемые значения номинальных постоянных времени опытного ДТГ: $T_{1sf} = 3,355$ c; $T_{2sf} = 1,044$ c; $E_{sf} = 3,020$ c.

Одной из проверок правильности нахождения характеристических кривых по предлагаемой методике является выполнение следующих условий на всем диапазоне α:

- при l = 2 необходимо, чтобы $T_{1sf} > E_{sf} > T_{2sf}$

если $T_{1sf} > T_{2sf}$; – при l = 3 необходимо, чтобы $T_{1sf} > E_{1sf} > T_{2sf}$ – $>E_{2sf}>T_{3sf}$, если $T_{1sf}>T_{2sf}>T_{3sf}$ Как следует из рисунка 2 и таблицы 2, на-

званные условия для номинальных постоянных времени модели 2 опытного датчика выполняются во всем диапазоне изменения коэффициента теплообмена α, что может служить основанием для доверия к полученным результатам.

Заключение

Разработана методика, позволяющая прогнозировать номинальные динамические характеристики датчиков температуры газов конкретных типов в ожидаемых условиях эксплуатации по результатам испытаний ограниченного числа экземпляров датчиков в воздушном потоке на аттестованных установках.

Точность получаемых результатов зависит от числа испытуемых датчиков, числа значений скорости воздушного потока, при которых проводятся испытания, диапазона скоростей воздушного потока, используемых методик определения значений постоянных времени выбранных моделей датчиков температуры газов и точности вычисления коэффициентов теплообмена поверхности чувствительного элемента как с воздушным потоком при испытаниях, так и с газовым потоком в ожидаемых условиях.

Список использованных источников

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

2. Aeronautical research facilities // Heat Transfer Measurements. Temperature Measurement Application Data. – Bulletin 7619. – Appendix E. – 1975. – Rosemount Engineering Company.

3. *Петунин, В.И.* Помехоустойчивый самонастраивающийся измеритель температуры газа ГТД / В.И. Петунин, Р.Р. Сибагатуллин, А.И. Фрид // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 1 (67). – С. 147–155.

4. *Ярышев, Н.А.* Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н.А. Ярышев. – 2-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отдние, 1990. – 254 с.

5. Шербаков, М.А. Восстановление входного сигнала по результатам идентификации динамических характеристик средств измерений / М.А. Шербаков, В.П. Иосифов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 3–8.

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

7. Рао, Г.П. Идентификация порядка и параметров непрерывных линейных систем при помощи функций Уолша / Г.П. Рао, Л. Сивакумар // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике / пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – Т. 70, № 7. – С. 89–91.

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

9. Патент РФ 2568973, МПК G01К 15/00. Способ определения параметров затухающего переходного процесса термодатчика / А.Ф. Сабитов, И.А. Сабитова; заявитель и патентообладатель Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – № 2014130291/28; заявл. 22.07.2014; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 1 с.: ил.

10. *Сабитов, А.Ф.* Идентификация динамических характеристик авиационных датчиков температуры газов / А.Ф. Сабитов, И.А. Сафина // Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 211–218. **doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

References

1. Vavirovskaja S.L., Zaharov D.L., Korneev M.V. [Automation determination of dynamic and high-speed characteristics of temperature sensors in the installation of air VB-010 CIAM]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation industry], 2016, vol. 04, pp. 28–29 (in Russian).

2. Aeronautical research facilities. *Heat Transfer Measurements. Temperature Measurement Application Data*, Bulletin 7619, Appendix E., 1975 Rosemount Engineering Company.

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

4. Yaryshev N.A. [Theoretical basis of measurement of unsteady temperature] *Teoreticheskie osnovy izmereniya nestatsionarnykh temperatur*. Energoatomisdat, Leningrad. Dep-tion, 1990, 254 p. (in Russian).

5. Sherbakov M.A., Iosifov V.P. [Restoration of the input signal based on the results of identification of dynamic characteristics of measuring instruments]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science], 2007, no. 3, pp. 3–8 (in Russian).

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

7. Pao G.P., Sivakumar L. [Order and Parameter Identification in Continuous Linear Systems via Walsh Functions]. *Trudy instituta inzhenerov po elektrotekhnike i radioelektronike (TIIJeR)* [Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers], 1982, vol. 70, no. 7, pp. 89–91 (in Russian).

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

9. Sabitov A.F., Sabitova I.A. Sposob opredeleniya parametrov zatukhayushchego perekhodnogo protsessa termodatchika [The method for determining the parameters of a damped transient thermal sensor]. Patent RF, no. 2568973, 2015.

10. Sabitov A.F., Safina I.A. [Identification of dynamic characteristics of aircraft gas temperature sensors]. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], 2016, vol. 7, no. 2, pp. 211–218 (in Russian). **doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-211-218

УДК 614.841

Конструкция и алгоритм работы лазерного комбинированного пожарного извещателя

Кицак А.И.¹, Лущик А.П.¹, Есипович Д.Л.¹, Конон В.Н.², Кавальчук И.В.², Протасевич О.А.², Третьяк И.Б.³

¹Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь ²ЗАО «Запспецтехсервис», ул. М. Богдановича, 120Б, кв. 6, г. Минск 220040, Беларусь ³Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 27.09.2016 Принята к печати 23.01.2017

Точечный оптический дымовой пожарный извещатель остается в настоящее время наиболее эффективным средством обнаружения пожара на ранней стадии его появления. Актуальной задачей для данного типа извещателя является повышение его чувствительности к «черным» дымам и обеспечение устойчивости к воздействию электромагнитных помех и частиц не дымового происхождения. Целью настоящей работы являлась разработка конструкции и алгоритма работы точечного комбинированного пожарного извещателя, обеспечивающего высокую чувствительность к различным типам дымов, скорость их обнаружения и высокую помехоустойчивость.

Решение поставленной цели осуществлено использованием предложенной оптической схемы двухканального устройства обнаружения дыма (по контролю интенсивностей излучения, рассеянного частицами дыма и прошедшего через дым).

Разработана конструкция и алгоритм работы комбинированного пожарного извещателя, включающего двухканальное лазерное устройство обнаружения дыма и датчик угарного газа.

Результаты тестовых испытаний изготовленного извещателя свидетельствуют о его повышенной в сравнении с обычным одноканальным точечным дымовым пожарным извещателем чувствительности к различным типам дымов и скорости обнаружения возгораний. Высокие функциональные характеристики извещателя обеспечиваются применением дополнительного канала обнаружения дыма (по изменению интенсивности проходящего через него излучения), созданными условиями беспрепятственного захода дыма в зону контроля и эффективным алгоритмом обработки регистрируемых сигналов.

Ключевые слова: пожар, комбинированный пожарный извещатель, «серый» дым, «черный» дым, чувствительность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22

Адрес для переписки: Кицак А.И. Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь e-mail: kitsak48@yandex.ru	Address for correspondence: Kitsak A.I. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Soltisa str., 183a, Minsk 220046, Belarus e-mail: kitsak48@yandex.ru
Для цитирования: Кицак А.И., Лущик А.П., Есипович Д.Л., Конон В.Н., Кавальчук И.В., Протасевич О. А., Третьяк И.Б. Конструкция и алгоритм работы лазерного комбинированного пожар- ного извещателя. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 1. С. 15–22. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22	<i>For citation:</i> Kitsak A.I., Lushchyk A.P., Esipovich D.L., Konon V.N., Kavalchyk I.V., Protasevich O.A., Tretyak I.B. [Construction and the algorithm operation of the laser combined fire detector]. <i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements]. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 15–22 (in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22

Construction and the algorithm operation of the laser combined fire detector

Kitsak A.I.¹, Lushchyk A.P.¹, Esipovich D.L.¹, Konon V.N.², Kavalchyk I.V.², Protasevich O.A.², Tretyak I.B.³

¹Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltisa str., 183a, Minsk 220046, Belarus
²JSC «Zapspectehservis»,
M. Bogdanovicha str., 120B, apt. 6, Minsk 220040, Belarus
³Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 27.09.2016 Accepted for publication 23.01.2017

Abstract

The point optical smoke detector is currently the most effective means of fire detection at the early stage of its occurrence. The urgent task for this type of detector is to increase its sensitivity to «black» smoke and ensure resilience to the effects of electromagnetic interference and particle smoke origin. The objective of this work is to develop a structure and algorithm of point combined fire detector that provides high sensitivity to various types of fumes, detection rate and high noise immunity.

The decision of the current objective is carried out using the proposed optical scheme of the dual-channel devices of smoke detection (for control of the radiation intensities scattered by smoke particles and passed through the smoke).

The design and algorithm of the combined fire detector comprising a dual-channel laser device of smoke detection and carbon monoxide detector is developed.

The results of the made detector tests indicate about its increased in comparison with the conventional single-channel point smoke fire detector sensitivity to various types of fumes and detection rate of fires. The high functional characteristics of the detector are provided with application additional channel of smoke detection (to intensity change of transmitted radiation through it) created by the requirements for unrestricted entry of smoke in the area of control and effective algorithm for processing of recorded signals.

Keywords: fire, combined fire detector, «grey» smoke, «black» smoke, sensitivity.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22

Адрес для переписки: Кицак А.И. Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь e-mail: kitsak48@yandex.ru	Address for correspondence: Kitsak A.I. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Soltisa str., 183a, Minsk 220046, Belarus e-mail: kitsak48@yandex.ru
Для цитирования: Кицак А.И., Лущик А.П., Есипович Д.Л., Конон В.Н., Кавальчук И.В., Протасевич О. А., Третьяк И.Б. Конструкция и алгоритм работы лазерного комбинированного пожар- ного извещателя. Приборы и методы измерений. 2017. – Т. 8, № 1. С. 15–22. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22	<i>For citation:</i> Kitsak A.I., Lushchyk A.P., Esipovich D.L., Konon V.N., Kavalchyk I.V., Protasevich O.A., Tretyak I.B. [Construction and the algorithm operation of the laser combined fire detector]. <i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements]. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 15–22 (in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-15-22

Введение

В настоящее время широкое применение для обнаружения возгораний находят мультикритериальные пожарные извещатели [1–2]. Данный класс извещателей обеспечивает максимальную достоверность обнаружения пожара благодаря комплексному анализу состояния контролируемой среды по различным факторам пожара. Непременным компонентом мультикритериального извещателя является устройство обнаружения дыма – одно из наиболее скоростных средств обнаружения возгорания. Как правило, для этой цели используется традиционный оптический дымовой извещатель с принципом обнаружения, рассеянного его частицами.

Хорошо известны функциональные ограничения данного типа дымового извещателя, а именно низкая чувствительность к «черным» дымам и наличием сопротивления заходу дыма в дымовую камеру вследствие ее конструктивных особенностей [3–7]. Данные ограничения приводят к увеличению времени обнаружения возгорания при отсутствии конвективных потоков воздуха и росту числа ложных срабатываний при повышении чувствительности усилительного тракта извещателя для обнаружения «черных» дымов.

Более высокой способностью обнаруживать «черные» дымы обладают линейные оптические дымовые извещатели [8–9]. Данное свойство обеспечивается применяемым в них принципом обнаружения дыма, основанным на контроле интенсивности излучения, проходящего через дым. При прохождении излучения через дым происходит ослабление его интенсивности. Ослабление обусловлено как рассеянием части излучения частицами дыма, так и его поглощением. «Черные» дымы, в которых преобладают поглощающие частицы, заметно ослабляют интенсивность проходящего через них излучения и, таким образом, легко обнаруживаются линейным извещателем на ранней стадии пожара.

Для обеспечения высокой чувствительности к «серым» дымам, рассеивающим излучение в основном вперед, линейные дымовые извещатели рекомендуется применять при размерах контролируемого оптического пути защищаемого пространства, равным не менее 6 м.

В [10] предложена оптическая схема линейного дымового извещателя, позволяющая эффективно обнаруживать дым на оптическом пути, примерно равном поперечному размеру современного точечного дымового извещателя. Данная схема открывает возможность разработки конструкции точечного дымового пожарного извещателя с высокой чувствительностью к «черным» дымам.

Целью настоящей работы являлась разработка конструкции и алгоритма работы точечного комбинированного пожарного извещателя на основе двухканального оптического устройства обнаружения дыма (по контролю интенсивности излучения, рассеянного частицами дыма, и контролю интенсивности излучения, прошедшего через дым), обеспечивающего высокую чувствительность к различным типам дымов и скорость их обнаружения.

Оптическая схема двухканального устройства обнаружения дыма

На рисунке представлена оптическая схема двухканального устройства обнаружения дыма.

Схема включает узел источника и два узла приемников излучения (узел приема проходящего через дым излучения и узел приема излучения, рассеянного частицами дыма).

Узел источника состоит из лазера 1, генерирующего излучение с малой угловой расходимостью, прозрачной пластинки 2, отражающей часть излучения на опорный приемник 3, самого опорного приемника 3, линзы 4, фокусирующей излучение лазера в зону контроля среды, и защитной пластинки 5.

Узел приемника проходящего излучения включает собирающую линзу 6, формирующую с увеличением, равным 1, изображение пятна фокусировки излучения источника в плоскость диафрагмы 7 и приемника излучения 8.

Узел приемника излучения, рассеянного частицами дыма, состоит из светофильтра 9 и приемника 10. Светофильтр подбирается с полосой пропускания в области спектра излучения источника.

Узел источника совместно с узлом регистрации проходящего через дым излучения составляют собственно оптическую схему линейного дымового извещателя. Узел источника совместно с узлом регистрации рассеянного частицами дыма излучения формируют оптическую схему традиционного оптического точечного дымового извещателя.



Рисунок – Оптическая схема двухканального устройства обнаружения дыма: І – узел источника (1 – лазер; 2 – прозрачная пластинка; 3 – опорный приемник; 4 – линза; 5 – защитная пластинка 5; II – узел приема проходящего излучения (6 – собирающая линза; 7 – диафрагма; 8 – приемник излучения); III – узел приема рассеянного излучения (9 – светофильтр; 10 – приемник)

Figure – The optical scheme of laser dual-channel fire smoke detector: I – source node (1 – laser; 2 – transparent plate; 3 – reference receiver; 4 – lens; 5 – protective plate); II – transmitted radiation receiving node (6 – collecting lens; 7 – aperture; 8 – radiation receiver); III – scattered radiation

Принцип работы двухканального устройства обнаружения дыма

Принцип работы данного устройства, согласно представленной на рисунке оптической схеме, состоит в следующем. Излучение лазерного источника 1 направляется на прозрачную пластинку 2 и фокусирующий элемент, в качестве которого используется, например, положительная линза 4. Часть излучения, отраженная пластинкой 2, регистрируется опорным приемником 3, контролирующим мощность исходного излучения лазера. Излучение, прошедшее через пластинку, попадает на линзу 4, которая формирует пятно фокусировки в зоне захода дыма в устройство. Линза 6 формирует изображение данного пятна в плоскости отверстия диафрагмы 7 в масштабе приблизительно 1:1. Прошедшее через отверстие излучение попадает на приемник 8.

В отсутствие дыма излучение лазерного источника попадает только на опорный приемник 3 и сигнальный приемник 8. Диаметр отверстия диафрагмы 7 подбирается примерно равным диаметру пятна фокусировки, сформированного линзой 6 в отсутствие дыма. По сигналам, формируемым опорным и сигнальным приемниками, осуществляются контроль интенсивности излучения источника и корректировка чувствительности приемной схемы электронного блока регистрации проходящего излучения при уменьшении интенсивности излучения лазера.

При появлении дыма часть излучения источника, рассеянная частицами дыма из области

фокусировки, попадает на линзу 6 и приемник излучения 10. Линза 6 формирует в плоскости отверстия диафрагмы 7 изображение пятна фокусировки как в проходящих, так и рассеянных лучах. Основная часть рассеянного частицами дыма излучения распространяется под большими углами к оси источника излучения и не попадает в отверстие диафрагмы. Через отверстие проходит и регистрируется приемником 8 в основном не рассеянное дымом излучение. Интенсивность этого излучения уменьшается с увеличением плотности дыма. При достижении определенной скорости падения сигнала, регистрируемого приемником 8, и постоянстве сигнала, формируемого приемником 3, появляется сигнал «Тревога» в виде определенного состояния логического устройства.

Приемник 10 регистрирует излучение рассеянное частицами дыма. Его интенсивность растет с увеличением плотности дыма. При достижении определенной скорости роста сигнала на выходе приемника 10, а также постоянстве сигнала на выходе приемника 3 формируется также сигнал «Тревога».

Если одновременно происходит падение с заданной скоростью сигнала в канале регистрации проходящего через дым излучения и рост с определенной скоростью сигнала в канале регистрации рассеянного излучения, появляется сообщение «Пожар». Данное состояние индицируется характерным для пожарных извещателей световым сигналом. Кроме того, выдается сообщение во внешние цепи. Для исключения ложного срабатывания устройства при воздействии частиц не дымового происхождения работа его сопрягается с реакцией на состояние среды датчика (СО). Как известно, данный газ выделяется при горении большинства веществ. Процедура принятия решения о выдаче сигнала «Пожар» при этом изменяется. Устройство выдает сообщение «Пожар» только тогда, когда одновременно с сигналом «Тревога» по одному из дымовых каналов регистрируется появление СО в концентрации, превышающей уровень 40 ppm.

Извещатель состоит из корпуса, внутри которого закреплена оптическая сборка, состоящая из узла источника излучения, узла приема рассеянного излучения и узла приема проходящего излучения. Внутри корпуса извещателя крепятся также датчик СО и модуль управления и цифровой обработки регистрируемых сигналов.

Узел источника состоит из расположенных в цилиндрическом корпусе источника излучения, плоскопараллельной пластинки для отражения части излучения на приемник опорного излучения, положительной линзы для фокусировки излучения в зону захода дыма и плоскопараллельной пластинки из оптического стекла для предотвращения попадания внутрь корпуса частиц пыли и дыма.

В качестве источника излучения используется лазерный модуль МЛ 150-0940-60-TTL со встроенными драйверами стабилизации и модуляции мощности излучения. Модуль генерирует излучение с расходимостью $\approx 0,3$ мрад. на длине волны $\lambda = 940$ нм. Средняя мощность излучения ≈ 60 мВт. Излучение фокусируется положительной линзой с апертурой равной 6,5 мм и фокусным расстоянием f = 15 мм в зону захода дыма в пятно размером ≈ 30 мкм.

Приемником опорного излучения, как и других регистрируемых в извещателе излучений, служит фотодиод HPDB5b-14h. Максимум спектральной чувствительности фотодиода приходится на $\lambda = 940$ нм. Напряжение его питания равно 5 В.

Узел приема рассеянного излучения состоит из корпуса в виде стакана с двумя широкими прорезями на боковой поверхности для захода дыма. По центру противоположных стенок стакана имеются отверстия с резьбами для соединения его с одной стороны с узлом источника излучения, а с другой – с узлом приемника проходящего излучения. В стенке корпуса узла приема рассеянного излучения, соединяющейся с узлом приемника проходящего излучения, проделано отверстие под корпус самого приемника рассеянного излучения и светофильтр. В качестве светофильтра используется пластинка из ПММА-690 толщиной $\approx 2,73$ мм. Граница пропускания видимого диапазона длин волн излучения материала пластинки находится на длине волны $\lambda = 690$ нм. Коэффициент пропускания излучения на длине волны $\lambda = 940$ нм составляет 91–92 %.

Узел приема проходящего излучения состоит из корпуса цилиндрического вида. На одном из его концов крепится линза диаметром 6,5 мм и фокусным расстоянием f = 9 мм. На противоположном конце корпуса крепится приемник проходящего излучения вместе с установленной перед ним диафрагмой с отверстием. Линза строит изображение пятна фокусировки излучения, сформированного в зоне захода дыма, в плоскость диафрагмы по центру отверстия. Диаметр отверстия диафрагмы составляет ≈ 60 мкм.

Модуль управления и цифровой обработки регистрируемых сигналов извещателя собран на базе 8-битного микроконтроллера PIC16F88-I/ SL.

Алгоритм работы лазерного комбинированного пожарного извещателя

Алгоритм работы извещателя состоит в выполнении последовательности математических и логических действий над регистрируемыми сигналами и выдачи сигналов извещения на внешние исполнительные устройства. Он реализуется по заранее записанной в памяти микроконтроллера программе. Условно в ней можно выделить:

- процесс калибровки извещателя;

 верификацию текущих значений регистрируемых сигналов;

– формирование сигналов извещения.

Каждый раз при подаче питания на инициализированный микроконтроллер (микроконтроллер, в память которого введены данные о переменных величинах, константах, портах ввода, вывода и т.д.) в отсутствие дыма осуществляется тестирование извещателя. Заключается оно в определении исходных физических параметров окружающей среды и сохранении их значений в памяти микроконтроллера для последующей оценки величин изменения параметров среды при наличии дыма.

Процесс тестирования длится 30 с и включает обмен за интервал времени, равный 1 с, данными

микроконтроллера по SPI протоколу с каждым из внешних 12-разрядных модулей АЦП, отвечающих за измерения сигналов в каналах обнаружения возгорания. Для каналов опорного, проходящего и рассеянного излучений выборка сигнала происходит на частоте 666 Гц. Измерения производятся в максимумах и минимумах TTL модулированного сигнала с интервалом 0,75 мс. Результатом измерения является амплитуда сигнала за вычетом его значения в минимуме, усредненная по более чем 500 разностям значений.

В СО канале за время 1 с через интервал 0,75 мс производится более 1000 отсчетов значений напряжения на выходе операционного усилителя сигнала датчика СО. Результатом измерения является усредненное по числу отсчетов значение напряжения.

Полученные по четырем каналам измерений данные сохраняются в памяти микроконтроллера. Циклы измерений сигналов и сохранение их в памяти микроконтроллера за 1 с продолжается до 10 с. Начиная с 11-й и последующих секунд, измеренные значения сигналов по каждому из каналов обнаружения возгорания сравниваются с соответствующими значениями, полученными на 10 с раньше.

Если на 11-й секунде: 1) значение сигнала, измеренное в каналах регистрации опорного и проходящего излучений, не ниже (более чем на 10 мВ) соответствующего значения, измеренного в момент времени (t-10) c; 2) значение сигнала, измеренное в канале регистрации рассеянного излучения, не превышает (более чем на 100 мВ) соответствующее значение, измеренное в момент времени (t-10) c; 3) сигнал от датчика CO находится в пределах от 0,4 до 0,8 В, то режим тестирования завершается. Измеренные значения сигналов заносятся в энергонезависимую память ЕЕРROМ микроконтроллера. В память микроконтроллера заносится также пороговое значение напряжения в канале обнаружения угарного газа, равное 1300 мВ. Регистрируемые сигналы фиксируются в памяти как сигналы «Норма» в отсутствие задымления. Завершение режима «Тест» и переход извещателя в дежурный режим работы индицируются кратковременным включением индикатора красного цвета с периодичностью не реже одного раза в минуту.

Если на 11-й секунде не выполняется хотя бы одно из перечисленных выше условий, особенно условие по СО каналу, циклы измерений повторяются до положительного результата. В случае когда за время 30 с сигналы «Норма» не будут зафиксированы, режим «Тест» продлевается еще на 30 с. Режим «Тест» сопровождается последовательным зажиганием световых индикаторов дымовых и газового каналов обнаружения возгорания.

После окончания тестирования извещатель переходит в режим верификации сигналов (дежурный режим работы). Он заключается в измерении за тот же промежуток времени 1 с текущих значений сигналов по каждому из каналов обнаружения возгорания, запоминании их значений и сопоставлении со значениями, полученными в моменты времени (t-10) с. Если в процессе работы происходит уменьшение сигнала, измеренного в канале регистрации проходящего излучения, на величину, равную или больше 10 мВ относительно значения, зарегистрированного в этом канале в момент времени (t-10) c, а средняя величина опорного сигнала остается неизменной, формируется сигнал «ТРЕВОГА». Это состояние индицируется миганием индикатора красного цвета длительностью больше 1 с.

Если в это же время отклик сигнала в канале регистрации рассеянного излучения, превышает значение сигнала в момент времени (*t*-10) с на 100 или больше милливольт, формируется сигнал «ТРЕВОГА», который индицируется миганием индикатора желтого цвета длительностью больше 1 с. Аналогично, если отклик сигнала в канале регистрации СО превышает значение сигнала в момент времени (*t*-10) с на 50 мВ или допустимый уровень 0,8 В, формируется сигнал «ТРЕ-ВОГА», который индицируется миганием индикатора синего цвета длительностью больше 1 с.

В случае одновременной выдачи сигналов «ТРЕВОГА» по одному из дымовых каналов обнаружения возгорания и каналу регистрации СО (появление логического состояния «И») формируется сигнал «ПОЖАР». Это состояние извещателя индицируется постоянным свечением индикатора красного цвета. При этом микроконтроллер выдает также сигнал на замыкание оптореле для выдачи сигнала «ПОЖАР» во внешние цепи.

Если сигнал «ПОЖАР» не выдан в течение одной секунды, одиночные сигналы «ТРЕВОГА» по каналу 1, каналу 2 и каналу 3 или двойной сигнал «ТРЕВОГА» канал 1 и «ТРЕВОГА» канал 2 снимаются и извещатель переходит в дежурный режим работы.

Сигнал «ПОЖАР» снимается только отключением питания извещателя. При повторной подаче питания на извещатель его работа начинается с выполнения режима «ТЕСТ».

Результаты испытаний лазерного комбинированного пожарного извещателя

Объем испытаний изготовленного лазерного комбинированного пожарного извещателя ограничен определением основных параметров его функционального назначения и оценкой эффективности обнаружения пожара при натурных испытаниях согласно СТБ 16.03-2009 по 5 типам тестовых очагов пожара.

Минимальное пороговое значение оптической плотности дыма, обнаруживаемого в канале регистрации рассеянного излучения $\approx 0,05$ дБ/м. Минимальное пороговое значение оптической плотности дыма, обнаруживаемого в канале регистрации проходящего через дым излучения $\approx 0.9 \, \text{дБ/м.}$ Измерение порогов срабатывания опытного образца извещателя проводилось в дымовой камере по методике СТБ 16.03-2009. Установлено, что основной причиной, ограничивающей чувствительность «линейного» канала обнаружения дыма, является нестабильность мощности излучения источника, которая составляла $\approx 0.25 \, \%$. Минимальная концентрация СО, обнаруживаемая датчиком СО, равна $\approx 40 \, \text{ppm.}$

Испытания прототипа пожарного извещателя на обнаружение тестовых очагов пожара проводились одновременно с тестовыми испытаниями обычного одноканального точечного дымового извещателя с примерно таким же значение пороговой чувствительности, как у прототипа по каналу контроля рассеянного излучения. Результаты испытаний сведены в таблицу.

Таблица / Table

Результаты испытаний пожарных извещателей на эффективность обнаружения тестовых очагов пожара Test results of smoke detectors on the effectiveness of seats of fire detection

		Время обнаружения пожара каналами комбинированного извещателя, с			
Тип тестового цожара	Время обнаружения пожара оптическим	Fire detection time by the channels of combined detector, s			Время обнаружения пожара комбинированным
пожара	дымовым извещателем, с	Канал	Канал	Канал	извещателем, с
Type of test fire	Fire detection time by optical smoke detector, s	рассеянного излучения	проходящего излучения	регистрации СО газа	Fire detection time by combined
	-	Scattered	Transmitted	Registration CO	detector, s
		radiation	radiation channel	gas channel	
ТП-1	355	180		205	226
ТП-2	1115	1120		1138	1156
ТП-3	136	60		70	70
ТП-4	89	65		75	77
ТП-5			150	220	230

Полученные результаты тестовых испытаний лазерного комбинированного пожарного извещателя свидетельствуют о его повышенной в сравнении с обычным одноканальным точечным дымовым пожарным извещателем чувствительности к различным типам дымов. Почти все тестовые очаги пожара за исключением тестового очага ТП-2 были обнаружены комбинированным извещателем быстрее классического оптического дымового пожарного извещателя. Задержку в обнаружении им тестового очага пожара ТП-2 можно объяснить более низким (чем в обычном извещателе) расположением относительно потолка его дымозахода, что повлияло на скорость захода данного типа дыма в зону контроля комбинированного извещателя.

Заключение

Разработана конструкция и алгоритм работы комбинированного пожарного извещателя на основе двухканального лазерного устройства обнаружения дыма и датчика угарного газа.

Результаты тестовых испытаний разработанного пожарного извещателя свидетельствуют о его повышенной в сравнении с обычным одноканальным точечным дымовым пожарным извещателем чувствительности к различным типам дымов.

Высокие функциональные характеристики извещателя достигнуты благодаря ряду технических, конструктивных и принципиальных решений реализованных в извещателе. К ним относятся: применение лазерного источника, обладающего высокой интенсивностью и малой расходимостью излучения;

– расположение приемника рассеянного изучения под малым углом к направлению свечения лазера для эффективного обнаружения «серых» дымов, частицы которых рассеивают излучение в основном вперед;

 использование дополнительного принципа обнаружения дыма, по изменению интенсивности проходящего через него излучения вследствие, как рассеяния на его частицах, так и поглощения для повышения чувствительности к «черным» дымам;

 – создание конструкции оптического устройства обнаружения дыма без традиционной дымовой камеры, обеспечивающей беспрепятственный заход дыма в зону контроля;

 применение датчика угарного газа и эффективного алгоритма обработки регистрируемых сигналов, позволившим обнаруживать пожар с высокой достоверностью.

Список использованных источников

1. *Pfister, G.* Multisensor/Multicriteria Fire Detector: A New Trend Rapidly Becomes State of the Art / G. Pfister // Fire Technologe. – 1997. – Vol. 33, issue 2. – P. 115–133

2. *Здор, В.А.* Мультикритериальные пожарные извещатели. Перспективы применения / В.А. Здор // Пожарная безопасность. – 2015. – № 2. – С. 113–118.

3. Зайцев, А. Чувствительность пожарных извещателей к различным типам дыма, пыли, пара, аэрозолям. Часть 1 / А. Зайцев // Алгоритм безопасности. – 2012. – № 3. – С. 17–19.

4. Зайцев, А. Чувствительность пожарных извещателей к различным типам дыма, пыли, пара, аэрозолям. Часть 2 / А. Зайцев // Алгоритм безопасности. – 2012. – № 4. – С. 34–39.

5. Себенцов, Д. Дымовой? Тепловой? Комбинированный? Проблема выбора типа пожарного извещателя для вашего объекта / Д. Себенцов // Алгоритм безопасности. – 2005. – №5. – С. 50–57.

6. *Мущинский, В.А.* Совершенствование технических параметров пожарных извещателей / В.А. Мущинский // Пожарная безопасность. – 2015. – № 3. – С. 123–126.

7. *Порошин, А.А.* Совершенствование нормативного проектирования систем пожарной сигнализации / А.А. Порошин [и др.] // Пожарная безопасность. – 2015. – № 3. – С. 114–123.

8. *Неплохов, И.Г.* Линейные дымовые пожарные извещатели / И.Г. Неплохов // Грани безопасности. – 2006. – № 33. – С. 42–46.

9. *Неплохов, И.Г.* Развитие дымовых извещателей / И.Г. Неплохов // Грани безопасности. – 2008. – № 53. – С. 25–26.

10. *Кицак, А.И.* Извещатель пожарный оптический дымовой / А.И. Кицак [и др.] // Патент ВУ № 9045 на полезную модель, 2012.

References

1. Pfister G. Multisensor/Multicriteria Fire Detector: A New Trend Rapidly Becomes State of the Art. *Fire Technologe*, 1997, vol. 33, issue 2, pp. 115–133.

2. Zdor V.A. [Multicriteriale fire detectors. Prospects of application]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2015, no. 2, pp. 113–118 (in Russian).

3. Zaitsev A.V. [The sensitivity of the fire detectors of different types of smoke, dust, vapor, aerosols. Part 1]. *Algoritm bezopasnosti* [Algorithm safety], 2012, no. 3, pp. 17–19 (in Russian).

4. Zaitsev A.V. [The sensitivity of the fire detectors of different types of smoke, dust, vapor, aerosols. Part 2]. *Algoritm bezopasnosti* [Algorithm safety], 2012, no. 4, pp. 34–39 (in Russian).

5. Sebentsov D.A [Smoke? Thermal? Combined? The problem of choosing the smoke detector type for object] *Algoritm bezopasnosti* [Algorithm safety], 2005, no. 5, pp. 50–57 (in Russian).

6. Muschinsky V.A. [Improvement of technical parameters of fire detectors]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2015 no. 3, pp. 123–126 (in Russian).

7. Poroshin A.A., Starshinov B.P., Surkov S.A. Filaretov M.B. [Improvement of regulatory design of fire alarm systems] *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety]. 2015, no. 3, pp. 114–123 (in Russian).

8. Neplokhov I.G. [Linear smoke detectors] *Grani bezopasnosti* [Faces safety] 2006, no. 33, pp. 42–46.

9. Neplokhov I.G. [The development of smoke detectors] *Grani bezopasnosti* [Faces safety] 2008, no. 53, pp. 25–26 (in Russian).

10. Kitsak A.I., Lushchyk A.P., Esipovich D.L., Gamezo A.M. *Izveshchatel' pozharnyi opticheskii dymovoi* [The optical smoke fire detector]. Patent BY no. 9045, 2012.

УДК 53.089.62; 519.245; 539.125.52

Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140

Комар Д.И.¹, Кутень С.А.²

¹УП «АТОМТЕХ», ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь ²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, 11, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 13.01.2017 Принята к печати 14.02.2017

В метрологическом обеспечении средств измерений нейтронного излучения в качестве эталонов широкое распространение получили установки с коллимированным полем излучения, создаваемым радионуклидными источниками нейтронов. Целью данной работы являлось исследование влияния рассеянного нейтронного излучения на такие метрологические характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПН-АТ140, как плотность потока и амбиентный эквивалент мощности дозы с использованием метода Монте-Карло.

При калибровке испытуемый прибор помещают в нейтронное поле с известной плотностью потока или амбиентным эквивалентом мощности дозы. Пучок нейтронов от радионуклидного источника быстрых нейтронов может быть сформирован в различных геометриях. В контейнере-коллиматоре установки поверочной нейтронного излучения УПН-АТ140 устанавливаются специальные вставки, отвечающие геометрии быстрых и геометрии тепловых нейтронов. Из-за наличия рассеянного излучения необходимо вносить поправки на рассеянную компоненту, обусловленную рассеянием нейтронов в воздухе и стенами помещения. Измерение характеристик нейтронного поля установки могут быть проведены в ограниченном числе точек, а в остальных точках используется модельный метод.

Контейнер-коллиматор установки со вставкой для геометрии тепловых нейтронов формирует пучок от радионуклидного источника нейтронов со значительной составляющей нейтронов тепловых энергий. Из полученной зависимости полного потока нейтронов от расстояния до источника нейтронов видно, что за счет рассеянного в коллиматоре излучения нарушается закон обратных квадратов. Вклад рассеянного стенами помещения излучения в полный поток нейтронов увеличивается при удалении от источника нейтронов и значительно влияет на характеристики поля нейтронов. При открытом источнике в геометрии теневого конуса, спектр нейтронов имеет ярко выраженную тепловую компоненту, обусловленную рассеянием от стен.

Рассмотрены основные типы геометрий для формирования поля эталонного нейтронного излучения с использованием радионуклидных источников. Разработана Монте-Карло модель ²³⁸Pu-Be-источника нейтронов и контейнера-коллиматора установки УПН-АТ140. Показано, что наиболее существенным фактором, влияющим на энергетическое распределение нейтронов, является вклад излучения, рассеянного в помещении, где расположена установка. Это приводит к значительному изменению спектра нейтронного излучения при удалении от источника. При проектировании помещения и размещения в нем установки необходимо учитывать требования к качеству излучения.

Ключевые слова: Монте-Карло моделирование, радионуклидный источник нейтронов, поле нейтронного излучения, коллиматор; метод теневого конуса.

Адрес для переписки: Address for correspondence: Комар Д.И. Komar D. НПУП «АТОМТЕХ», SPE «ATOMTEX». ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь Gikalo str. 5, Minsk 220005, Belarus e-mail: damiankomar@yandex.ru e-mail: damiankomar@yandex.ru For citation: Лля иитирования: Комар Д.И., Кутень С.А. For citation: Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические Komar D., Kutsen S. [Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПНof AT140 Neutron Calibration Facility]. AT140. Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements]. Приборы и методы измерений. 2017. - T. 8, № 1. - C. 23-31. 2017, vol. 8, no. 1, pp. 23-31(in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31 DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31

Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics of AT140 Neutron Calibration Facility

Komar D.¹, Kutsen S.²

¹SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, , Minsk 220005, Belarus ²*Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University Bobruiskaya str., 11, Minsk 220030,, Belarus*

Received 13.01.2017 Accepted for publication 14.02.2017

Abstract

Today facilities with collimated radiation field are widely used as reference in metrological support of devices for neutron radiation measurement. Neutron fields formed by radionuclide neutron sources. The aim of this research was to study characteristics of experimentally realized neutron fields geometries on AT140 Neutron Calibration Facility using Monte Carlo method.

For calibration, we put a device into neutron field with known flux density or ambient equivalent dose rate. We can form neutron beam from radionuclide fast-neutron source in different geometries. In container-collimator of AT140 Neutron Calibration Facility we can install special inserts to gather fast-neutron geometry or thermal-neutron geometry. We need to consider neutron scattering from air and room's walls. We can conduct measurements of neutron field characteristics in several points and get the other using Monte Carlo method.

Thermal neutron collimator forms a beam from radionuclide source with a significant amount of neutrons with thermal energies. From found relationship between full neutron flux and distance to neutron source we see that inverse square law is violated. Scattered radiation contribution into total flux increases when we are moving away from neutron source and significantly influences neutron fields characteristics. While source is exposed in shadow-cone geometry neutron specter has pronounced thermal component from wall scattering.

In this work, we examined main geometry types used to acquire reference neutron radiation using radionuclide sources. We developed Monte Carlo model for ²³⁸Pu-Be neutron source and AT140 Neutron Calibration Facility's container-collimator. We have shown the most significant neutron energy distribution factor to be scattered radiation from room's walls. It leads to significant changes of neutron radiation specter at a distance from the source. When planning location, and installing the facility we should consider radiation quality requirements.

Keywords: Monte Carlo simulation, radionuclide neutron source, fields of neutron radiation, collimator, shadow cone method.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Комар Д.И.	Komar D.
НПУП «ATOMTEX»,	SPE «ATOMTEX»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь	Gikalo str. 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: damiankomar@yandex.ru	e-mail: damiankomar@yandex.ru
Для цитирования:	For citation:
Комар Д.И., Кутень С.А.	For citation:
Влияние рассеянного нейтронного излучения на метрологические	Komar D., Kutsen S.
характеристики поверочной установки нейтронного излучения УПН-	[Influence of scattered neutron radiation on metrological characteristics
AT140.	of AT140 Neutron Calibration Facility].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 23–31.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 23–31(in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-23-31

Введение

При проведении испытаний средств измерений нейтронного излучения широко используются радионуклидные источники быстрых нейтронов [1, 2]. В метрологическом обеспечении средств измерений нейтронного излучения в качестве эталонов широкое распространение получили установки с полем излучения, создаваемым радионуклидными источниками нейтронов. Обычно применяют установки, в которых нейтронное поле создается источником нейтронов, размещенном в контейнере-коллиматоре (коллимированная геометрия), и установки с отсутствующими вблизи источника рассеивателями (открытая геометрия).

Наиболее существенным фактором, влияющим на энергетическое распределение нейтронного излучения, является рассеянное излучение, возникающее в помещении, где размещается установка [3-5], а также ослабление прямого и рассеянного нейтронного излучения воздухом [6]. В общем случае для коллимированной геометрии значение величины плотности потока или амбиентного эквивалента мощности дозы можно представить как сумму вкладов от трех источников: от прямого излучения источника нейтронов, размещенного в начале координат (центр источника); от источника, характеризующего рассеянное в контейнере-коллиматоре излучение; от распределенного источника рассеянного в помещении излучения [1, 7]. Измерения характеристик нейтронного поля установки могут быть проведены в ограниченном числе точек, а в остальных точках используется метод Монте-Карло [8].

В отсутствии ослабления и рассеяния излучения для точечного источника излучения выполняется закон обратных квадратов, т.е. значение величины H на некотором расстоянии R от источника определяется через значение величины H_0 на некотором расстоянии R_0 как:

$$H = H_0 \cdot (R_0 / R)^2.$$
 (1)

При наличии рассеянного излучения, в закон обратных квадратов необходимо вносить поправочные коэффициенты. Поправки будут зависеть от источника нейтронов, геометрии, размеров помещения и расстояния до центра источника [9, 10].

Целью данной работы являлись: установление влияния рассеянного излучения на характеристики нейтронных полей в геометриях, реализуемых экспериментально на установке поверочной нейтронного излучения УПН-АТ140, при помощи метода Монте-Карло; оценка вклада рассеянного излучения в пучок нейтронов в зависимости от геометрических размеров помещения; определение энергетических спектров нейтронов для контейнера-коллиматора со вставками для геометрии быстрых и тепловых нейтронов, а также геометрии теневого конуса.

Материалы и методы

Геометрия узкого пучка, или коллимированная геометрия, характеризуется тем, что рассеянные нейтроны не попадают в точку измерения. Обычно это достигается использованием специально сконструированных коллиматоров, форма которых обеспечивает такие условия, при которых нерассеянный пучок не попадает на внутреннюю поверхность выходной части коллиматора, а для рассеянных нейтронов вдоль пучка создаются ловушки. В геометрии широкого пучка детектор либо помещается в среду, либо располагается в непосредственной близости к рассеивателю. За счет эффектов обратного рассеяния нейтронов спектры в среде отличаются от спектров за барьером. В точку измерения попадают как нерассеянные, так и значительное число рассеянных нейтронов [7].

На рисунке 1 показана типичная конструкция коллиматора, обеспечивающего геометрию узкого пучка.



Рисунок 1 – Конструкция коллиматора, обеспечивающего геометрию узкого пучка: 1 – источник нейтронов; 2 – контейнер-коллиматор; 3 – коллиматор; 4 – детектор нейтронов; 5 – полость блока-замедлителя; 6 – канал коллиматора

Figure 1 – Narrow beam geometry collimator design: 1 – neutron source; 2 – container-collimator; 3 – collimator; 4 – neutron detector; 5 – decelerator bloc cavity; 6 – collimator bore

Контейнер-коллиматор изготавливается с применением материалов, которые будут минимизировать вклад рассеянного коллиматором излучения. Обычно для этих целей применяется полиэтилен с добавлением бора и дополнительно устанавливаются поглощающие кадмиевые экраны.

На рисунке 2 изображена схема геометрии широкого пучка.



Рисунок 2 – Геометрия широкого пучка: 1 – рассеиватель; 2 – источник; 3 – слой поглотителя; 4 – детектор нейтронов

Figure 2 – Wide beam geometry: 1 – scatterer; 2 – source; 3 – absorbent layer; 4 – neutron detector

В геометрии широкого пучка рассеивателем является среда расположенная в непосредственной близости к источнику, либо источник может быть полностью в нее погружен (вода, парафин, полиэтилен). Поглотителем может быть как вещество, в которое помещен источник, так и специальные экраны, такие как теневой конус, пластина кадмия, слой борированного полиэтилена и так далее [11].

Установка поверочная нейтронного излучения УПН-АТ140, разработанная научно-производственным унитарным предприятием «АТОМ-ТЕХ», предназначена для поверки дозиметров нейтронного излучения по амбиентному эквиваленту мощности дозы нейтронного излучения и радиометров нейтронного излучения по плотности потока быстрых нейтронов в стандартном поле нейтронного излучения источника ²³⁸Pu-Be (типа ИБН-8-6) и обеспечивает стабильные характеристики в диапазоне расстояний от 500 до 3000 мм. В этом диапазоне расстояний от центра источника с учетом поправок выполняется закон обратных квадратов (1).

Контейнер-коллиматор установки выполнен из борированного полиэтилена и размещается в кожухе из алюминия с кадмиевой защитой. В контейнер-коллиматор устанавливаются специальные вставки, отвечающие геометрии быстрых или геометрии тепловых нейтронов. Вставка для геометрии быстрых нейтронов представляет собой коллиматор из борированного полиэтилена с каналом в форме конуса. Тепловая вставка выполнена целиком из полиэтилена с воздушными цилиндрическими каналами для уменьшения альбедо нейтронов в направлении пучка.

Наиболее приемлемым расчетным методом является метод Монте-Карло. Преимущество метода Монте-Карло перед другими методами определяется возможностью рассмотрения переноса частиц в сколь угодно сложных по геометрическим условиям и по составу средах без необходимости существенного упрощения вычислительного алгоритма [8].

Монте-Карло моделирование проводилось с помощью кода *MCNP* (версия *MCNP-4b*). Разработана Монте-Карло модель контейнера-коллиматора установки УПН-АТ140 с геометрией быстрых и с геометрией тепловых нейтронов. На рисунке 3 изображена Монте-Карло модель контейнера-коллиматора для обеих геометрий.



Рисунок 3 – Монте-Карло модель контейнера-коллиматора с геометрией быстрых (*a*) и с геометрией тепловых нейтронов (*b*): 1 – кожух из алюминия; 2 – контейнер-коллиматор; 3 – ²³⁸Ри-Ве-источник нейтронов ИБН-8-6; 4 – воздушные каналы; 5 – вставка для геометрии быстрых нейтронов; 6 – вставка для геометрии тепловых нейтронов

Figure 3 – Monte-Carlo model of container-collimator with geometry for fast (*a*) and thermal-neutrons (*b*): 1 – aluminum casing; 2 – container-collimator; $3 - {}^{238}$ Pu-Be fast-neutron source (IBN-8-6); 4 – air channels; 5 – insert for fast-neutron geometry; 6 – insert for thermal-neutron geometry

Источник типа ИБН-8-6 относится к радионуклидным источникам нейтронов, образующихся в результате взаимодействия α – частиц с легкими ядрами бериллия. Активная часть источника представляет собой сплав диоксида плутония-238 с порошком бериллия. Сплав помещен в стальную оболочку и герметизирован.

Для источника в *MCNP* необходимо задать энергетический спектр излучения [8]. Из работы [12] был взят энергетический спектр нейтронов для ²³⁸Pu-Be-источника, оцифрован и обработан для применения в *MCNP* (рисунок 4). Размеры нейтронного источника ИБН-8-6 были приняты в соответствии с технической документацией изготовителя.



Рисунок 4 – Спектр нейтронов ²³⁸Ри-Ве-источника нейтронов [12]

Figure 4 – Neutron specter for ²³⁸Pu-Be fast neutron source [12]

Выход нейтронов был принят равным 1,91·10⁷ нейтр./с., что соответствует источнику ИБН-8-6.

Результаты и их обсуждение

Для оценки спектральных характеристик нейтронных полей, формируемых геометриями быстрых и тепловых нейтронов установки УПН-АТ140, были проведены расчеты потока нейтронов в энергетических интервалах с применением карты *tally* f_4 [8]. Расчет проводился для точки на расстоянии 100 см от центра источника при отсутствии стен помещения. На рисунке 5 приведены полученные энергетические спектры нейтронов для обеих геометрий (источник ИБН-8-6).



Рисунок 5 – Энергетические спектры нейтронов: 1 – геометрия тепловых нейтронов; 2 – геометрия быстрых нейтронов

Figure 5 – Neutron energy spectra: 1 – thermal-neutron geometry; 2 – fast-neutron geometry

На рисунке 5 видно, что спектр, сформированный «тепловой» геометрией, имеет значительную составляющую тепловых нейтронов. В спектре от «быстрой» геометрии практически отсутствуют нейтроны с энергиями менее 1 эВ.

За счет рассеянного в контейнере-коллиматоре излучения будет нарушаться закон обратных квадратов. На рисунке 6 приведены значения полного потока нейтронов в зависимости от расстояния до центра источника нейтронов для различных геометрий.



Рисунок 6 – Зависимость значений полного потока нейтронов от расстояния до источника: 1 – «быстрая» геометрия; 2 – «тепловая» геометрия; 3 – «тепловая» геометрия с кадмиевым экраном; 4 – теоретическая кривая, описывающая закон обратных квадратов

Figure 6 – Relationship between total neutron flux and distance to radiation source: 1 – fast geometry; 2 – thermal geometry; 3 – thermal geometry with Cd-shield; 4 – theoretical inverse square law curve

На рисунке 6 кривая, описывающая закон обратных квадратов (1), совмещена с кривой для тепловой вставки в точке 100 см. При приближении к коллиматору значение полного потока больше теоретического (закона обратных квадратов) изза вклада нейтронов, рассеянных коллиматором, а при удалении от коллиматора меньше из-за рассеяния нейтронов в воздухе [9].

Для оценки вклада рассеянного излучения в пучок нейтронов была разработана модель помещения. Размеры помещения составляют $12 \times 6 \times 3$ м с толщиной стен 100 см и потолка 150 см, пол – 15 см бетона на грунте. Контейнерколлиматор установки с быстрой геометрией был размещен на расстоянии 2 м от задней стены по центру. При том же положении контейнера относительно передней и задней стен, расчет был проведен также для помещений $12 \times 6 \times 6$ м и $12 \times 10 \times 10$ м. Таким образом, можно установить влияние размеров помещения на количество рассеянных нейтронов [5]. На рисунке 7 приведены результаты расчетов зависимости вклада рассеянного излучения от размеров помещения.



Рисунок 7 — Вклад рассеянного излучения в полный поток нейтронов для геометрии с коллиматором: 1 — для помещения $12 \times 6 \times 3$ м; 2 — для помещения $12 \times 6 \times 6$ м; 3 — для помещения $12 \times 10 \times 10$ м

Figure 7 – Scattered radiation contribution into total neutron flux for collimated geometry: $1 - \text{for } 12 \times 3 \times 3 \text{ m}$ room; $2 - \text{for } 12 \times 6 \times 6 \text{ m room}$; $3 - \text{for } 12 \times 10 \times 10 \text{ m}$ room

Из зависимости вклада рассеянного излучения в значение величины полного потока нейтронов и мощности дозы, можно сделать вывод, что в помещении присутствует поле рассеянного излучения, вклад которого в величину полного потока увеличивается с расстоянием. Вклад рассеянного излучения в полную мощность дозы будет меньше, чем в поток, так как отраженные нейтроны имеют меньшую энергию. Следовательно, увеличение размеров помещения и оптимальное расположение установки позволяют добиться снижения числа рассеянных нейтронов и улучшить её точностные характеристики.

При проведении экспериментов в помещении значение величины полного потока либо мощности дозы *H* на расстоянии *R* от центра источника представляется в виде суммы вкладов прямого излучения источника и рассеянного излучения коллиматором и стенами помещения. Для применения закона обратных квадратов на практике необходимо в формулу (1) добавить поправочные коэффициенты:

$$H = H_0 \cdot (R_0 / R - d)^2,$$
 (2)

где *d* – смещение эффективного центра источника.

Величины смещений *d* могут быть получены для всех расстояний в пределах диапазона изме-

рений через рассчитанные методами Монте-Карло *H* и *H*₀ [6, 10].

В *MCNP* расчете использовался специальный детектор, так называемый точечный детектор [8], установленный на расстоянии *R* от источника.

На рисунке 8 приведена полученная зависимость d от расстояния до центра источника для геометрии быстрых нейтронов в помещении $12 \times 6 \times 3$ м.



Рисунок 8 – Зависимость смещения эффективного центра источника *d* от расстояния до центра источника: 1 – для полного потока нейтронов; 2 – для амбиентного эквивалента мощности дозы

Figure 8 – Relationship between effective source center d and distance to radiation source: 1 – for total neutron flux; 2 – for ambient equivalent dose rate

В данном примере, когда за реперную точку принята точка $R_0 = 100$ см видно, что при $R > R_0$ величина *d* принимает положительные значения, а при $R < R_0$ отрицательные в некотором диапазоне расстояний. Это связано с распределением рассеянного излучения в помещении. При приближении к коллиматору установки вклад рассеянного уменьшается из-за экранирования нейтронов, отраженных от стен, расположенных за коллиматором и не находящихся в прямой видимости детектора. Дальнейшее уменьшение расстояния от источника приводит к увеличению числа нейтронов, рассеянных плоскостями коллиматора. По этой причине не рекомендуется проводить эксперименты на расстоянии менее 50 см.

Для определения величины *H* с применением закона обратных квадратов также можно использовать поправочный коэффициент *F*:

$$H = F \cdot H_0 \cdot (R_0 / R)^2.$$

Монте-Карло моделирование и последующие расчеты проводились аналогично расчетам величины *d*.



Рисунок 9 – Зависимость поправочного коэффициента *F* от расстояния до центра источника: 1 – для полного потока нейтронов; 2 – для амбиентного эквивалента мощности дозы

Figure 9 – Relationship between correction factor F and distance to radiation source: 1 – for total neutron flux; 2 – for ambient equivalent dose rate

Пояснения к полученным зависимостям аналогичны пояснениям по величине *d*.

При работе в открытой геометрии коллиматор отсутствует и в точку измерения попадает как прямое излучение от источника, так и рассеянное от стен помещения. Для выделения из полного потока нейтронов рассеянной компоненты, измерения проводят в два этапа. Сначала измеряется полный поток при отсутствии поглотителя во всем диапазоне расстояний, затем на оси пучка устанавливается поглощающий (теневой) конус. Конус экранирует детектор от прямых нейтронов и проводятся измерения потока отраженных от стен частиц. По разнице показаний прибора в этих двух геометриях определяется прямое излучение.

Геометрия и материалы теневого конуса могут изменятся как в зависимости от энергетического спектра применяемого источника и его размеров, так и от формы детектора и методики проведения эксперимента.

Для Pu-Be-источников используется конус, состоящий из двух секций: из железа длиной 20 см, и из борированного полиэтилена длиной 30 см [1, 9]. На рисунке 10 изображена схема применения теневого конуса.

Для оценки изменений энергетических спектров нейтронов с учетом влияния теневого конуса был проведен Монте-Карло расчет. Результаты моделирования спектров приведены на рисунке 11.



Рисунок 10 – Схема теневого конуса: 1 – источник нейтронов; 2 – секция из железа; 3 – секция из борированного полиэтилена; 4 – детектор нейтронов

Figure 10 – Shadow cone design: 1 – neutron source; 2 – Fe-section; 3 – borated polyethylene section; 4 – neutron detector



Рисунок 11 – Спектры нейтронов: 1 – открытая геометрия в помещении без конуса; 2 – после установки поглощающего конуса

Figure 11 – Neutron spectra: 1 – geometry inside room without cone; 2 – after absorption cone installation

Теневой конус пропускает некоторое количество быстрых нейтронов. При открытом источнике в помещении спектр имеет ярко выраженную тепловую компоненту, обусловленную рассеянием от стен.

В случае открытой геометрии влияние теневого конуса будет различным для каждой точки. На небольших расстояниях между конусом и нейтронным источником количество рассеянных нейтронов будет незначительным, если конус эффективно поглощает большинство нейтронов, распространяющихся в переднюю полусферу по оси детектора [9].

Для открытой геометрии с применением теневого конуса закон обратных квадратов можно записать следующим образом:

$$(H_o - H_c) = M \cdot (H_{oo} - H_{co}) \cdot (R_0 / R)^2$$

где H_{o} и H_{c} – значения величин, соответствующих расстояниям от центра источника R_{o} и R в открытой геометрии; H_{oo} и H_{co} – значения величин, соответствующих расстояниям R_{o} и R, когда прямое излучение от источника поглощается, и значения этих величин обусловлены только рассеянным излучением; M – поправочные коэффициенты для каждого расстояния.

Коэффициент M указывает на характер влияния теневого конуса в зависимости от расстояния до детектора нейтронов и определяется через расчетные значения величин H_{co} , H_c и H_o , H_c .

На рисунке 12 показана зависимость поправочного коэффициента *М* для геометрии теневого конуса.



Рисунок 12 – Зависимость поправочного коэффициента *М* для геометрии с теневым конусом: 1 – для полного потока; 2 – для амбиентного эквивалента мощности дозы

Figure 12 - M-factor dependency for shadow cone geometry: 1 - for total flux; 2 - for ambient equivalent dose rate

При увеличении расстояния между конусом и детектором вклад рассеянного излучения увеличивается и затем остается постоянным в некотором диапазоне расстояний. Дальнейшее удаление детектора приводит к быстрому увеличению показаний по рассеянному излучению, как только конус перестает экранировать нейтронный детектор от источника [9].

Если же детектор располагается слишком близко к теневому конусу, последний экранирует детектор от нейтронов, рассеянных на стенах помещения.

Заключение

Рассмотрены основные типы геометрий для формирования поля эталонного нейтронного

излучения с использованием радионуклидных источников. Разработана Монте-Карло модель ²³⁸Pu-Ве-источника нейтронов ИБН-8-6 и контейнера-коллиматора установки УПН-АТ140. . С помощью моделирования методом Монте-Карло рассчитаны спектры нейтронов для геометрии быстрых и геометрии тепловых нейтронов.

Наиболее существенным фактором, влияющим на энергетическое распределение нейтронов, является вклад рассеянного излучения, возникающего в помещении, где расположена установка. Рассеянное стенами помещения нейтронное излучение приводит к значительному изменению энергетического спектра при удалении от источника и, таких метрологических характеристик установки, как плотность потока нейтронов и амбиентный эквивалент мощности дозы. Проведены оценки вклада рассеянного нейтронного излучения в значение величины плотности потока нейтронов в зависимости от размеров помещения.

Для геометрии быстрых нейтронов определены поправочные коэффициенты для расчета полного потока и амбиентного эквивалента мощности дозы, обусловленные рассеянным излучением.

Теневой конус пропускает некоторое количество быстрых нейтронов. При открытом источнике в помещении спектр нейтронов имеет ярко выраженную тепловую компоненту, обусловленную рассеянием от стен.

Список использованных источников

1. *Eisenhauer, C.M.* Calibration Techniques for Neutron Personal Dosymetry / C.M. Eisenhauer, J.B. Hunt, R.B. Schwartz // Radiation Protection Dosimetry. – 1985. – Vol. 10, iss. 1–4. – P. 43–57.

2. *Vega-Carrillo, H.R.* Spectrometry and dosimetry of a neutron source / H.R. Vega-Carillo, E. Manzanares-Acuna, V.M. Hernandez-Davila // Radiation Effects and Defects in Solids. – 2009. – Vol. 164, iss. 4. – P. 218–223.

3. *Vega-Carillo*, *H.R.* Study of room-return neutrons. / H.R. Vega-Carillo, E. Manzanares-Acuna, M.P. Iniguez. // Radiation Measurements. – 2007. – Vol. 42, iss. 3. – P. 413–419.

4. *McCall, R.C.* Room scattered neutrons / R.C. Mc-Call, P.H. McGinley, K.E. Huffman // Medical Physics. – 1999. – Vol. 26, iss. 2. – P. 205–207.

5. *Gallego, E.* Characterictics of the Neutron Field of the Facility at DIN-UPM / E. Gallego, A. Lorente // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 110, iss. 1–4. – P. 73–79.

6. *Eisenhauer, C.M.* Effect of Air Scatter on Calibration of Instruments for Detecting Neutrons / C.M. Eisenhauer, R.B. Schwartz, R.C. McCall // Radiation Protection Dosimetry. – 1987. – Vol. 19, iss. 2. – P. 77–84.

7. *Hunt, J.B.* The Calibration of Neutron Sensetive Spherical Devices / J.B. Hunt // Radiation Protection Dosimetry. – 1984. – Vol. 8, iss. 4. – P. 239–251.

8. *Briesmeister*; *J.F.* MCNP-A General Monte Carlo N-Paticle Transport Code, Version 4B. LA-12625-M./ J.F. Briesmeister; ed. Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos, 1997, 736 c.

9. *Kim, S.I.* Review of neutron scattering correction for the calibration of neutron survey meters using the shadow-cone metod / S.I. Kim, B.H. Kim, J.L. Kim // Nuclear Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 47, iss. 7. – P. 939–944.

10. *Eisenhauer, C.M.* Review of Scattering Corrections for Calibration of Neutron Instruments / C.M. Eisenhauer // Radiation Protection Dosimetry. – 1989. – Vol. 28, iss. 4. – P. 253–262.

11. *Vega-Carillo*, *H.R.* Low energy neutrons from a 239PuBe isotopic neutron source inserted in moderating media / H.R. Vega-Carillo, C.T. Muhech // Revista Mexicana de Fisica. – 2002. – Vol. 48, iss. 5. – P. 405–412.

12. *Faghihi, F.* Neutrons Flux Distributions of the Pu-Be Source and its Simulation by the MCNP-4B Code / F. Faghihi, S. Mehdizadeh, K. Hadad // International Journal of Modern Physics. – 2006. – Vol. 15, iss. 3. – P. 737–745.

References

1. Eisenhauer C.M., Hunt J.B., Schwartz R.B. Calibration Techniques for Neutron Personal Dosymetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 1985, vol. 10, iss. 1–4, pp. 138–147. **doi:** 10.1093/oxfordjournals.rpd.a079410

2. Vega-Carillo H. R., Manzanares-Acuna E., Hernandez-Davila V. M. Spectrometry and dosimetry of a neutron source. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 2009, vol. 164, iss. 4, pp. 218-223.

doi: 10.1080/10420150802271522

3. Vega-Carillo H.R., Manzanares-Acuna E., Iniguez M.P. Study of room-return neutrons. *Radiation* *Measurements*, 2007, vol. 42, iss. 3, pp. 413–419. **doi:** 10.1016/j.radmeas.2007.01.036

4. McCall R.C., McGinley P.H., Huffman K.E. Room scattered neutrons. *Medical Physics*, 1999, vol. 26, iss. 2, pp. 205–207. **doi:** 10.1118/1.598505

5. Gallego E., Lorente A. Characterictics of the Neutron Field of the Facility at DIN-UPM. *Radiation Protection Dosimetry*, 2004, vol. 110, iss. 1–4, pp. 73–79. **doi:** 10.1093/rpd/nch199

6. Eisenhauer C.M., Schwartz R.B., McCall R.C. Effect of Air Scatter on Calibration of Instruments for Detecting Neutrons. *Radiation Protection Dosimetry*, 1987, vol. 19, iss. 2, pp. 77–84.

doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a079923

7. Hunt J.B. The Calibration of Neutron Sensetive Spherical Devices. *Radiation Protection Dosimetry*, 1984, vol. 8, iss. 4, pp. 239–251.

doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a083078

8. Briestmeister J.F. ed. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A. Report LA-12625-M, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory,1994, 736 pp.

9. Kim S.I., Kim B.H., Kim J.L. Review of neutron scattering correction for the calibration of neutron survey meters using the shadow-cone metod. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47, iss. 7, pp. 939–944. **doi**: 10.1016/j.net.2015.07.005

10. Eisenhauer C.M. Review of Scattering Corrections for Calibration of Neutron Instruments. *Radiation Protection Dosimetry*, 1989, vol. 28, iss. 4, pp. 253–262. **doi**: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a080514

11. Vega-Carillo H.R., Muhech C.T. Low energy neutrons from a ²³⁹PuBe isotopic neutron source inserted in moderating media. *Revista Mexicana de Fisica*, 2002, vol. 48, iss. 5, pp. 405–412.

12. Faghihi F., Mehdizadeh S., Hadad K. Neutrons Flux Distributions of the Pu-Be Source and its Simulation by the MCNP-4B Code. *International Journal of Modern Physics*, 2006, vol. 15, iss. 3, pp. 737–745. **doi**: 10.1142/S0218301306004545

УДК 620.179.14

Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы накладного преобразователя вихретокового толщиномера

Чернышев А.В.

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

Поступила 14.12.2016 Принята к печати 09.02.2017

При вихретоковой толщинометрии электропроводящих двухслойных структур одним из мешающих факторов является наличие вариаций величины удельной электрической проводимости материала верхнего слоя (покрытия) при перемещении от точки к точке по поверхности объекта контроля или при переходе от одного объекта контроля к другому. Целью настоящей работы являлась оценка погрешности определения толщины проводящего покрытия, расположенного на проводящем ферромагнитном основании, при фазовом способе вихретокового контроля с помощью накладного преобразователя. Причиной погрешности являлись вариации величины удельной электрической проводимости материала покрытия.

Оценка погрешности проводилась на основе расчетов фазы вносимой в накладной преобразователь эдс по известным аналитическим выражениям для витка с током синусоидальной формы, расположенного над бесконечным полупространством с покрытием в виде тонкого слоя на его поверхности. Выбранные при расчетах электромагнитные параметры покрытия и основания примерно соответствуют случаю - слой хрома на никелевом основании. Расчеты проведены при различных частотах пропускаемого через виток тока.

Показано, что по мере уменьшения частоты проходящего через виток тока указанная погрешность уменьшается. Значение минимально возможной рабочей частоты тока возбуждения определяется условием отсутствия влияния на фазу вносимой в накладной преобразователь эдс вариаций толщины основания.

Для уменьшения указанной погрешности предложено определять, на основе фазового способа, при относительно высокой частоте тока возбуждения преобразователя удельную электропроводность материала покрытия. После этого, при более низкой частоте тока возбуждения, также при помощи фазового способа, определяется толщина покрытия, при этом учитывается определенная ранее величина удельной электропроводности покрытия. Также рассмотрены способы повышения точности фазовых измерений в мегагерцовой области частот тока возбуждения.

Ключевые слова: вихретоковая толщинометрия, накладной преобразователь, расчет, погрешность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Адрес для переписки:	Address for correspondence:	
Чернышев А.В.	Chernyshev A.V.	
Институт прикладной физики НАН Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy of	
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	Science of Belarus,	
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus	
	e-mail: lab5@iaph.bas-net.by	
Для цитирования:	For citation:	
Чернышев А.В.	Chernyshev A.V.	
Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя	[Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer	
двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы на-	sample on of phase introduced electromotive force of superimposed	
кладного преобразователя вихретокового толщиномера.	transducer of eddy current thickness meter].	
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].	
2017. – T. 8, № 1. – C. 32–39.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 32–39 (in Russian).	
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39	

Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer sample on of phase introduced electromotive force of superimposed transducer of eddy current thickness meter

Chernyshev A.V.

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

Received 14.12.2016 Accepted for publication 09.02.2017

Abstract

In carrying out eddy current thickness measurement of two-layer conductive objects one from the interfering factors is the presence of variations in the value of the electrical conductivity of the material of the upper layer (coating) when moving from point to point on the surface of object of control or when passing from one object of control to another. The aim of this work is to evaluate the accuracy of determining the thickness of the conductive coating disposed on a conducting ferromagnetic basis, using the phase method of eddy current testing. The reason of the error is variation of the electrical conductivity of the material of coating.

Determination of the error is based on calculations using known analytical expressions for the loop with current of sinusoidal form arranged over the infinite half space with a covering as a thin layer. Selected in calculating electromagnetic parameters of coating and substrate approximately correspond to the case -chromium layer on a nickel base. Calculations are performed for different frequencies of current passed through coil.

It is shown that at reduction of frequency of the current passes through the coil the error is reduced. The value of the lowest possible operating frequency of the excitation current is determined by the condition of absence influence on the phase introduced into the superimposed transducer emf variations in the thickness of the basis.

To reduce the indicated error it is proposed to determine, on the basis of phase method at a relatively high frequency transducer current excitation, conductivity of the material of coating. After this, at a low frequency excitation current and using phase method, the coating thickness is determined, taking into consideration the previously determined value of the conductivity of coating. Also discussed ways to improve the accuracy of phase measurements in the MHz region of the excitation current frequency.

Keywords: eddy current, thickness measurement, superimposed transducer, calculation, error.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Чернышев А.В.	Chernyshev A.V.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy of
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	Science of Belarus,
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
	e-mail: lab5@iaph.bas-net.by
 Для цитирования:	For citation:
Чернышев А.В.	Chernyshev A.V.
Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя	[Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer
двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы на-	sample on of phase introduced electromotive force of superimposed
кладного преобразователя вихретокового толщиномера.	transducer of eddy current thickness meter].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 32–39.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 32–39 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Введение

При вихретоковой толщинометрии двухслойной структуры, состоящей из проводящего верхнего слоя (покрытия), расположенного на проводящем ферромагнитном основании (подложке), эффективным является контроль, основанный на измерениях фазы ф вносимой в накладной преобразователь эдс [1]. По ее значению определяют толщину верхнего слоя *d*. В качестве накладного преобразователя обычно используется трехобмоточный трансформаторный преобразователь. Он содержит обмотку, создающую поле возбуждения, а также измерительную и компенсационную обмотки. Часто все обмотки располагаются на ферритовом сердечнике. Отсчет фазы ф ведется относительно тока возбуждения преобразователя, изменяющегося по гармоническому закону, в [2] для повышения точности измерений в качестве опорного сигнала предложено использовать эдс, наводимую в компенсационной обмотке преобразователя. Фаза вносимой в измерительную обмотку эдс зависит от геометрических параметров преобразователя, частоты f тока возбуждения, зазора между преобразователем и объектом контроля (ОК), удельных электрических проводимостей покрытия σ_1 и основания σ_2 , а также от относительной магнитной проницаемости основания µ.

На практике обычно наблюдаются вариации величины σ₁ при перемещении от точки к точке по поверхности ОК, при переходе от одного ОК к другому. Это приводит к вариациям величины ф при неизменном значении толщины покрытия *d*, что вызывает погрешность при определении d. При этом амплитудная, фазовая, амплитуднофазовая отстройка от влияния вариаций σ, на результаты измерений d практически невозможны [3]. Уменьшить влияние вариаций о, на показания вихретокового толщиномера можно путем понижения частоты f тока возбуждения преобразователя, однако в этом случае мешающими факторами могут стать вариации толщины подложки и магнитной проницаемости ее материала. В результате при малой толщине подложки приходится выбирать относительно высокую рабочую частоту f толщиномера и применять при этом способ отстройки от влияния вариаций величины σ₁ на результаты измерений *d*. Таким способом является определение величины σ₁ на основе измерения амплитуды А или (и) фазы ф вносимой в накладной преобразователь эдс при такой относительно высокой частоте поля возбуждения f, при которой на результаты измерений не оказывают влияния электромагнитные параметры подложки. После этого измерения φ или (и) A вносимой эдс производятся при более низкой частоте f, когда измеряемые параметры содержит информацию о толщине покрытия d. При этом при анализе результатов измерения φ или (и) A с целью определения значения d учитывается найденное значение σ_1 . Пример реализации такого способа контроля приведен в [4].

Отметим, что в известных вихретоковых толщиномерах, таких как «Константа», ТЛ-1МП, ТМ-4, ВТ-46НМ при относительно высокой рабочей частоте *f* отстройка от вариаций величины удельной электропроводности покрытия не предусмотрена.

Целью настоящей работы являлась оценка погрешности определения толщины проводящего покрытия, расположенного на проводящем ферромагнитном основании, при фазовом способе вихретокового контроля с помощью накладного преобразователя, возникающей из-за вариаций величины удельной электрической проводимости материала покрытия, а также рекомендации по уменьшению такой погрешности.

Результаты численных расчетов

В статье приведены результаты расчетов зависимости фазы ф вносимой в накладной преобразователь эдс от толщины покрытия d, полученные при различных значениях удельной электропроводности покрытия σ_1 и при различных *f*. Расчеты проведены по известным аналитическим выражениям, приведенным, например, в работе [5]. Расчет проведен для преобразователя в виде двух витков - создающего электромагнитное поле возбуждения, и измерительного - расположенных над проводящим ферромагнитным полупространством, на поверхности которого имеется проводящее покрытие. Схема расположения витков над двухслойным ОК показана на рисунке 1. Методика расчета подобна примененной в работе [6]. Сначала приняты следующие электромагнитные параметры материалов покрытия и подложки – $\sigma_1 = 5,291$ МСм/м (что примерно соответствует электропроводности хрома, приводимой в справочной литературе; обозначим данное численное значение как σ_{10}), $\sigma_2 = 11,5$ МСм/м и μ, = 100, что примерно соответствует электропроводности и относительной магнитной проницаемости никеля. Амплитудное значение тока возбуждения принято равным 1 А, радиусы Rобоих витков одинаковы и равны 0,002 м, расстояние h от витка, создающего поле возбуждения, до поверхности полупространства составляет 0,001 м, измерительный виток расположен посередине этого расстояния. Расчеты проведены при различных значениях f.



Рисунок 1 – Витки над проводящей двухслойной средой: 1 – измерительный виток; 2 – виток, создающий электромагнитное поле возбуждения; 3 – проводящее покрытие; 4 – проводящая магнитная подложка

Figure 1 – The coils above the conducting twolayer medium: 1 – measuring coil; 2 – coil creates an electromagnetic excitation field; 3 – conductive coating; 4 – magnetic conducting substrate

Результаты расчетов, полученные при $f = 300 \ \kappa \Gamma$ ц, представлены на рисунке 2 линией 1. (При такой частоте глубина проникновения δ_с плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 400 мкм.) При этом по вертикальной координатной оси отложены не значения ϕ , а абсолютная величина разности фаз $\phi - \phi_{Cu}$, где формальной в измерительный виток эдс при расположении преобразователя над медным полупространством (электропроводность меди принята равной 58,1 МСм/м). Абсолютное значение разности $\phi-\phi_{_{Cu}}$ обозначено как Дифрой 2 на рисунке 2 обозначена зависимость $\Delta \phi$ от d, полученная при значении σ_1 , превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – при σ_1 меньшей σ_{10} на 20 %.

Рассмотрим, как вариации величины σ_1 сказываются на погрешности определения толщины покрытия d, определяемой по значениям $\Delta \varphi$. Предположим, что зависимость $\Delta \varphi$ от d, представленная линией 1 на рисунке 2, используется в вихретоковом толщиномере в качестве кали-

бровочной, т.е. на основании измерения значения $\Delta \varphi$ определяется толщина покрытия *d*. Основываясь на данных, приведенных на рисунке 2, определим, к какой относительной погрешности δ_d определения *d* при помощи этого толщиномера приведут вариации величины σ_1 на ± 20 % относительно значения σ_{10} . Анализ расчетных данных показывает, что в области толщин около 50 мкм максимальная относительная погрешность δ_d определения толщины покрытия составляет 31,7 %, в области толщин около 450 мкм значение δ_d равно 33 %.



Рисунок 2 – Зависимость $\Delta \phi$ от *d* при *f* = 300 кГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Figure 2 – Dependence of $\Delta \phi$ on *d* at *f* = 300 kHz: 1 – σ_1 = 5,291 MS/m; 2 – σ_1 = 6,3492 MS/m; 3 – σ_1 = 4,2328 MS/m

Далее рассмотрим зависимость $\Delta \phi$ от d, рассчитанную при более низкой частоте f = 30 кГц и при прежних параметрах преобразователя и образца. (В этом случае глубина проникновения б_с плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 1,26 мм). При $\sigma_1 = \sigma_{10} = 5,291 \text{ МСм/м}$ зависимость $\Delta \phi$ от *d* представлена линией 1 на рисунке 3. Как и на рисунке 2, цифрой 2 на рисунке 3 обозначена зависимость, полученная при значении σ₁, превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине σ_1 , меньшей σ₁₀ на 20 %. Из рисунка 3 видно, что при данной частоте поля возбуждения зависимость $\Delta \phi$ от dближе к линейной, чем в предыдущем случае. Анализ приведенных на рисунке 3 данных показывает, что в области толщин около 50 мкм максимальная относительная погрешность $\delta_{,n}$ возникающая при отклонениях величины σ, на ± 20 % относительно σ₁₀, равна 22 %. В области толщин около 450 мкм в таком случае мак-

Devices and Methods of Measurements 2017, vol. 8, no. 1, pp. 32–39 Chernyshev A.V.

симальное значение $\delta_d = 17$ %. Из этих данных можно сделать вывод, что по мере понижения f величина относительной погрешности δ_d , вызванная изменением значения σ_1 относительно σ_{10} на одну и ту же величину, уменьшается. Например, при еще более низкой частоте f = 3 кГц вариации σ_1 относительно σ_{10} на ± 20 % приводят к $\delta_d = 6,6$ % в области толщин покрытия около 50 мкм и к $\delta_d = 8,6$ % в области толщин около 500 мкм. Это объясняется тем, что по мере уменьшения f возрастает вклад в формирование вносимой эдс измерительного витка вихревых токов, возбуждаемых в подложке, электромагнитные параметры которой считаются неизменными.



Рисунок 3 – Зависимость $\Delta \phi$ от d при f = 30 кГц: 1 – $\sigma_1 = 5,291$ МСм/м; 2 – $\sigma_1 = 6,3492$ МСм/м; 3 – $\sigma_1 = 4,2328$ МСм/м

Figure 3 – Dependence of $\Delta \varphi$ on *d* at *f* = 30 kHz: 1 – $\sigma_1 = 5,291$ MS/m; 2 – $\sigma_1 = 6,3492$ MS/m; 3 – $\sigma_1 = 4,2328$ MS/m

Из приведенных данных следует, что для уменьшения относительной погрешности δ_d определения толщины покрытия, вызванной вариациями величины σ₁, необходимо определять значение σ_1 при относительно высокой частоте fс целью ее последующего учета при анализе результатов измерения фазы ф вносимой эдс преобразователя (с целью определения по значению ф величины d) при более низкой рабочей частоте fтолщиномера. Известные в настоящее время вихретоковые измерители удельной электрической проводимости металлов, такие как «Константа», ВЭ-26НП, ВЭ-27НЦ могут работать лишь с ОК, толщина которых превышает 300 мкм. Для определения удельной электропроводности более тонких покрытий необходимо проводить измерения при относительно высокой рабочей частоте f вихретокового толщиномера.

На рисунке 4 приведены результаты расчета зависимостей $\Delta \phi$ от *d*, полученные при f = 5,8 МГц и прежних параметрах преобразователя и образца. Как на рисунках 2 и 3, цифрой 2 на рисунке 4 обозначена зависимость, полученная при значении σ_1 , превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине σ_1 , меньшей σ_{10} на 20 %, цифрой 1 обозначена зависимость, полученная при $\sigma_1 = \sigma_{10}$. Из рисунка 4 следует, что при данной относительно высокой частоте f отсутствует зависимость $\Delta \phi$ от толщины *d* покрытия, когда она превышает 200 мкм. Это объясняется поверхностным эффектом, в результате которого ограничена глубина проникновения переменного электромагнитного поля возбуждения в проводящий материал. (При f = 5,8 МГц для рассматриваемого в данной работе материала с $\sigma_{10} = 5,291 \text{ MCm/m}$ значение $\delta_s = 91$ мкм.) При d > 200 мкм, как следует из рисунка 4, увеличение σ₁ относительно значения σ_{10} на 20 % приводит к уменьшению Δφ на 12 % относительно того значения, которое имеет место при $\sigma_1 = \sigma_{10}$. Уменьшение же σ_1 относительно σ_{10} на 20 % приводит соответственно к увеличению Дф на 18%. Из приведенных данных следует, что при относительно высокой частоте поля возбуждения f по измерениям величины ф можно определять значение удельной электропроводности материала покрытия σ₁. Далее будет рассмотрено, с какими техническими трудностями связано измерение ф при нахождении f в мегагерцовом диапазоне частот. Δφ, град.



Рисунок 4 – Зависимость $\Delta \phi$ от *d* при *f* = 5,8 МГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Figure 4 – Dependence of $\Delta \phi$ on *d* at *f* = 5,8 MHz: 1 – σ_1 = 5,291 MS/m; 2 – σ_1 = 6,3492 MS/m; 3 – σ_1 = 4,2328 MS/m
Методика измерения толщины покрытия при учете электропроводности материала покрытия

Перед проведением измерений необходимо знать примерное значение минимально возможной толщины покрытия d_{\min} , которая может быть у подлежащих контролю изделий. Определив каким-либо способом наиболее вероятное значение удельной электропроводности σ₁₀ материала покрытия, необходимо найти частоту f плоской электромагнитной волны, при которой глубина ее проникновения δ_s в такой материал будет примерно в 2,5 раза меньше значения d_{min}. Это объясняется тем, что максимальная глубина (от поверхности ОК) с которой может быть получена информация об электромагнитных параметрах проводящего материала при проникновении в него плоской электромагнитной волны, примерно равна 3δ_s. Кроме этого, при применении накладного преобразователя реальная глубина проникновения может быть меньше, чем б, изза неоднородного распределения в пространстве амплитуды напряженности магнитного поля возбуждения накладного преобразователя, данный вопрос рассмотрен в работе [6]. Например, из рисунка 4 следует, что для образцов с $d \ge 200$ мкм и $\sigma_1 = \sigma_{10} = 5,291$ МСм/м (и с учетом возможности присутствия образцов с $\sigma_1 = \sigma_{10} - 0.2\sigma_{10}$) при f=5,8 МГц, обозначим ее как f_H , можно проводить измерения о₁. При этом на результаты измерений не будут оказывать влияния электромагнитные параметры подложки (т.е. нет зависимости ф от *d*). Для определения величины σ_1 по результатам измерения ф необходимо провести калибровку толщиномера – определить соответствие между значениями φ от σ_1 при рабочей частоте f_{μ} . Такое соответствие может быть определено на основе экспериментальных измерений величин ф на наборе образцов с известными значениями удельной электропроводности их материала или на основе численных расчетов. Возможные способы такого расчета приведены, например, в работах [5, 7] (для накладного преобразователя без ферритового сердечника).

После этого выбирается более низкая, чем $f_{H^{2}}$ рабочая частота толщиномера, при которой обеспечивается контроль толщин покрытия в ожидаемом интервале их возможных значений, обозначим эту частоту как f_{L} . При рабочей частоте, равной f_{L} , фаза φ зависит как от σ_{1} , так и от d. При этой частоте проводится измерение фазы

ф вносимой в измерительную катушку накладного преобразователя эдс при его установке на ОК. После этого из определенных предварительно зависимостей ϕ от *d* (т.е. имеющих вид, подобный показанным на рисунках 2 и 3) выбирается та, которая соответствует определенной при $f = f_H$ величине удельной электропроводности σ, материала покрытия. По этой калибровочной зависимости определяется величина d на основе измеренного значения ф. Предварительный расчет зависимостей ф от *d* проводится по одному из способов, приведенных в тех же работах [5, 7]. Зависимости ф от d могут быть определены на основе экспериментальных измерений при наличии набора образцов с известными различными толщинами покрытий и различными величинами электропроводности материала покрытия.

Рабочая частота f_L выбирается по возможности низкой, но такой, чтобы на результаты измерений φ не сказывались возможные вариации толщины основания.

Погрешность измерений

Сначала оценим, с какой минимальной относительной погрешностью можно определять величину удельной электропроводности σ_1 материала покрытия, основываясь на измерениях фазы φ вносимой в измерительную катушку преобразователя эдс при частоте поля возбуждения $f_H = 5,8$ МГц. Как видно из рисунка 4, в этом случае при $d \ge 200$ мкм увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приводит к изменению $\Delta \varphi$ (и, соответственно, φ) на 0,35°. Обозначим такое изменение φ наблюдаемое при изменении σ_1 , как $D(\varphi_{\Delta\sigma})$, оно определяется выражением

$$D(\varphi_{\Delta\sigma}) = |\varphi(\sigma_{10}) - \varphi(\sigma_{1})|,$$

где $\varphi(\sigma_{10}) - \varphi$ аза вносимой эдс при удельной электропроводности материала покрытия σ_1 , равной σ_{10} ; $\varphi(\sigma_1) - \varphi$ аза вносимой эдс при σ_1 , равном в данном случае $\sigma_{10} + 0.2 \sigma_{10}$. Если же такие измерения провести при $f_H = 300$ кГц (на образцах с такой толщиной покрытия *d*, при которой электромагнитные параметры подложки не сказываются на результатах измерений), то увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приведет к большему изменению φ азы φ – значение $D(\varphi_{\Delta\sigma})$ составит в этом случае 0,86°. Следовательно, по мере повышения частоты поля возбуждения *f* уменьшается величина изменения φ азы $D(\varphi_{\Delta\sigma})$, происходящая при

изменении σ_1 на одну и ту же величину $\Delta \sigma_1$ относительно некоторого первоначального значения σ₁₀. Это можно представить как уменьшение чувствительности фазы φ к изменениям значения σ по мере роста f (понимая под чувствительностью величину $D(\phi_{\Lambda\sigma})/\Delta\sigma_1$). Именно этот фактор является главной трудностью при определении удельной электропроводности тонких слоев. Данный результат соответствует известному положению о том, что по мере роста величины обобщенного параметра β , определяемого как $\beta = R \sqrt{\omega \mu_0 \sigma_1}$ (где μ₀ – магнитная постоянная, равная 4π10⁻⁷ Гн/м; ω – угловая частота поля возбуждения), фаза вносимой в накладной преобразователь эдс, расположенный над проводящим немагнитным полупространством, приближается к предельному значению $-\pi/2$ [8].

Известно, что повысить чувствительность изменений амплитуды и фазы вносимой в накладной преобразователь эдс к изменениям величин σ_1 и *d* можно включением обмоток преобразователя в состав резонансного контура [9]. Однако при этом возникают трудности с обеспечением температурной стабильности амплитуды и фазы выходной эдс преобразователя (из-за температурных нестабильностей: а) магнитной проницаемости материала ферритового сердечника преобразователя; б) сопротивления обмоток преобразователя; в) емкости конденсаторов резонансного контура), увеличивается чувствительность фазы к вариациям зазора между преобразователем и ОК. При использовании резонансной схемы включения накладного преобразователя с ферритовым сердечником усложняются расчеты значений амплитуды и фазы его выходной эдс [10] по сравнению со случаем преобразователя без сердечника и без использования резонанса.

Повысить точность измерения фазы вносимой в накладной преобразователь эдс в мегагерцовом частотном диапазоне можно следующим образом: а) использовать в качестве опорного сигнала фазометра напряжение со специальной дополнительной обмотки преобразователя; б) расположить микросхемы предварительного усилителя и фазометра непосредственно возле обмоток преобразователя для исключения присутствия соединительного кабеля между ними; в) повышать точность фазометра в мегагерцовой области частот посредством использования современных высокочастотных микросхем, специально разработанных для фазовых измерений. Например, нами разработан фазометр, который в диапазоне частот от 1 МГц до 6 МГц измеряет фазу с абсолютной погрешностью ± 0,05°.

Как было показано выше, при f = 5,8 МГц для образцов с толщиной покрытия большей 200 мкм увеличение σ_1 на 20 % относительно значения σ_{10} приводит к изменению фазы $D(\phi_{\Delta\sigma})$ на 0,35° (см. рисунок 4). Следовательно, изменение фазы ϕ на 0,05° (т.е. это абсолютная погрешность измерения нашим фазометром), соответствует изменению σ_1 на 2,85 % относительно σ_{10} . (Так как увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} . Приводит к изменению ϕ на 0,35°, то изменению ϕ на 0,05° соответствует изменение σ_1 на 2,85 %.) Таким образом, в этом случае погрешность измерения изменений величины σ_1 относительно σ_{10} составляет 2,85 %.

Теперь рассмотрим, к какой относительной погрешности б_д определения толщины покрытия приведет наличие указанной погрешности (т.е. 2,85 %) определения σ_1 , например, при рабочей частоте $f_{L} = 30$ кГц. Ранее было показано, что в этом случае изменение σ₁ на 20 % относительно значения σ_{10} приводит к возникновению максимальной относительной погрешности δ_{a} в области толщин порядка 450 мкм, равной 17 %. В случае же изменения σ_1 , относительно σ_{10} , на величину погрешности 2,85 %, как показывает расчет, относительная погрешность δ_d при определении величины d составит 2,4 % (в той же области толщин порядка 450 мкм). Следовательно, провести измерения d с меньшей относительной погрешностью, при наличии указанной погрешности измерения σ₁, невозможно.

Заключение

Расчетами на основе использования известных аналитических выражений найдена относительная погрешность определения толщины проводящего покрытия, расположенного на ферромагнитном проводящем основании, вызванная вариациями удельной электропроводности σ, материала покрытия при фазовом способе вихретоковой толщинометрии. Расчеты проведены при разных частотах поля возбуждения накладного преобразователя. Уменьшить такую погрешность можно путем определения значения удельной электропроводности о, материала покрытия (на основе измерения фазы вносимой в накладной преобразователь эдс) при такой относительно высокой частоте поля возбуждения преобразователя, при которой электромагнитные параметры основания не оказывают влияния на формирование фазы вносимой в накладной преобразователь эдс. После этого измерения фазы φ вносимой эдс производятся при более низкой рабочей частоте преобразователя и по калибровочной зависимости фазы φ вносимой эдс от толщины покрытия *d*, взятой с учетом определенного значения удельной электропроводности σ_1 материала покрытия, определяется толщина покрытия *d*. Зависимости фазы φ вносимой эдс от толщины покрытия, и фазы φ вносимой эдс от толщины покрытия *d* при различных величинах удельной электропроводности σ_1 материала покрытия должны быть предварительно установлены на основе расчетных или экспериментальных данных.

Для уменьшения погрешности измерения фазы в мегагерцовом диапазоне частот поля возбуждения преобразователя рекомендуется использовать в качестве опорного сигнала фазометра напряжение, получаемое с дополнительной обмотки накладного преобразователя, располагать микросхемы предварительного усилителя и фазометра непосредственно возле обмоток преобразователя, максимально возможно повышать точность фазометра.

Список использованных источников

1. Ноймайер, П. Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий / П. Ноймайер // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 2 (40). – С. 29–30.

2. Вихретоковый измеритель: пат. Российской Федерации, МПК7 G01N 27/90 / В.А. Сясько, А.С. Булатов, М.Ю. Коротеев, П.В. Соломенчук; заявитель ЗАО «Константа». – № 2384839; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.03.2011 // Бюл. изобр. – 2011. – № 8.

3. Бакунов, А.С. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий / А.С. Бакунов, В.А. Калошин // Контроль. Диагностика. – 2016. – №1 (211). – С. 27–31.

4. Вихретоковый способ двухчастотного контроля изделий: пат. Российской Федерации, МПК7 G01B 7/06 / Н.Г. Богданов, В.А. Приходько, А.И. Суздальцев; заявитель Орловский государственный техн. унив. – № 2184931; заявл. 03.02.2000; опубл. 10.07.2002 // Бюл. изобр. – 2002. – № 19.

5. Герасимов, В.Г. Электромагнитный контроль / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков. – Кн. 3. – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с.

6. Чернышев, А.В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем / А.В. Чернышев // Приборы и методы измерений. – 2014. -№ 1 (8). – С. 73 – 77.

7. Li, Y. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens / Y. Li, T. Theodouli-

dis, G. YunTian // IEEETrans. Magn. – 2007. – V. 43. – P. 4010–4015.

8. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

9. Баженов, И.Н. Способ двухпараметрического контроля толщины немагнитных металлических покрытий / И.Н. Баженов, Ю.Б. Иванов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 3. – С. 127–132.

10. May, P. Numerical modeling and implementation of ferrite cored eddy current probes/ P. May, E. Zhou, D. Morton // NDT&E Internat. – 2007. – V. 40. – P. 566-576.

References

1. Nojmajer P. [Eddy current phase method of measuring the thickness of galvanic coatings]. *V mire nerazrushajushhego kontrolja* [In the world of non-destructive testing], 2008, no. 2 (40), pp. 29–30 (in Russian).

2. Sjas'ko V.A., Bulatov A.S., Koroteev M.Ju., Solomenchuk P.V. *Vihretokovyj izmeritel*' [Eddy Current meter]. Patent RF, no. 2384839, 2011.

3. Bakunov A.S., Kaloshin V.A. [Development of the eddy current thickness measurement of coatings]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 1 (211), pp. 27–31 (in Russian).

4. Bogdanov N.G., Prihod'ko V.A., Suzdal'cev A.I. *Vihretokovyj sposob dvuhchastotnogo kontrolja izdelij* [Eddy current method of dual frequency control of products]. Patent RF, no. 2184931, 2002.

5. Gerasimov V.G., Pokrovskij A.D., Suhorukov V.V. *Jelektromagnitnyj kontrol*' [Electromagnetic control]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1992. Book 3, 312 p.

6. Chernyshev A.V. [Selection of the operating frequency of eddy current thickness gauge with superimposed transducer]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2014, no. 1 (8), pp. 73–77 (in Russian).

7. Li Y., Theodoulidis T., YunTian G. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens. *IEEETrans. Magn.*, 2007, vol. 43, pp. 4010–4015. **doi:** 10.1109/TMAG.2007.904930

8. Kljuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 656 p.

9. Bazhenov I.N., Ivanov Ju.B. [Method of two-parameter control of the thickness of non-magnetic metallic coatings]. *Fundamental 'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2015, no. 3, pp. 127-132.

10. May P., Zhou E., Morton D. Numerical modeling and implementation of ferrite cored eddy current probes. *NDT&E Internat.*, 2007, vol. 40, pp. 566–576. **doi:** 10.1016/j.ndteint.2007.06.003 УДК 612.76+796.022+611.7

Классификации технических средств физической культуры и оценка их эффективности на основе биомеханических принципов построения двигательных действий

Сотский Н.Б.

Белорусский государственный университет физической культуры, пр. Победителей, 105, г. Минск 220020, Беларусь

Поступила 28.12.2016 Принята к печати 30.01.2017

Классификация технических средств физической культуры и спорта с учетом современного состояния спортивной науки является одной из важных задач, позволяющих планировать разработку перспективных направлений развития тренажерных технологий. Существующие подходы к группировке технических средств данного назначения в недостаточной мере учитывают биомеханические закономерности построения физических упражнений и их эффективность. Целью данной работы было построение нового подхода к классификации таких устройств, учитывающего указанные закономерности.

В работе предложена система группировки технических средств физической культуры, состоящая в выделении биомеханически обоснованных уровней построения физического упражнения (психоинформационного, физиологического и механического) в качестве конечных целевых объектов, аналогичных входных уровней воздействия и соответствующих средств. Как результат, предложена цифровая индексация указанных объектов, позволяющая сгруппировать и представить технические средства в матричной форме в зависимости от сочетания индексов и, находя незаполненные области матрицы, определять перспективные направления новых разработок.

В соответствии с предложенной классификацией на примере технических средств силовой тренировки впервые вводится понятие биомеханической эффективности устройств, для чего предлагаются специальные численные коэффициенты: пространственности, инерционности и рассеивания энергии.

Приведен качественный анализ типичных средств силовой тренировки с точки зрения биомеханической эффективности, показавший перспективу конструирования технических устройств со многими степенями свободы, использующих фрикционный способ создания тренировочного сопротивления.

Ключевые слова: физическое упражнение, техническое средство, классификация, биомеханическая эффективность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48

Адрес для переписки: Сотский Н.Б. Белорусский государственный университет физической культуры, пр. Победителей, 105, г. Минск 220020, Беларусь e-mail: nsotsky@gmail.com	Address for correspondence: Sotsky M.B. Belarusian State University of Physical Culture, Pobediteley Ave., 105, Minsk 220020, Belarus e-mail: nsotsky@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
Сотский Н.Б.	Sotsky M.B.
Классификации технических средств физической культуры и оценка	[Classifications of technical means of physical training and assessment
их эффективности на основе биомеханических принципов	of their effectiveness based on biomechanical principles of structuring
построения двигательных действий.	motor actions].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 40–48.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 40–48 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48

Classifications of technical means of physical training and assessment of their effectiveness based on biomechanical principles of structuring motor actions

Sotsky M.B.

Belarusian State University of Physical Culture, Pobediteley Ave., 105, Minsk 220020, Belarus

Received 28.12.2016 Accepted for publication 30.01.2016

Abstract

Classification of technical means of physical exercise and sport taking into account the current state of sports science is one of the important tasks that allow planning the development of promising trends in training equipment technologies. Existing approaches to grouping technical means of physical training do not adequately take into account the biomechanical regularities of structuring exercises and their effectiveness. The aim of this work was to build a new approach to the classification of such devices taking into account the regularities above.

The article suggests the system of grouping means of physical training that includes picking out biomechanically substantiated levels of physical exercise structuring (psycho-informational, physiological and mechanical levels) as final targets, similar input levels of impact and the appropriate means. As a result, digital indexing of the above targets was proposed which allows to group and present the technical means in the form of matrix depending on the combination of the indexes and to determine promising trends in novel developments finding the blank areas in the matrix.

In accordance with the proposed classification by the example of technical means of strength training, the concept of the biomechanical efficiency of the devices is introduced for the first time, for which specific numerical coefficients were introduced such as spatiality, inertia and energy dissipation.

The paper presents a qualitative analysis of the typical means of strength training in terms of biomechanical efficiency, which showed the prospect of engineering technical devices with many degrees of freedom using the friction method of creating the resistance when training.

Keywords: physical exercise, technical means, classification, biomechanical efficiency.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Сотский Н.Б.	Sotsky M.B.
Белорусский государственный университет физической культуры,	Belarusian State University of Physical Culture,
пр. Победителей, 105, г. Минск 220020, Беларусь	Pobediteley Ave., 105, Minsk 220020, Belarus
e-mail: nsotsky@gmail.com	e-mail: nsotsky@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
Сотский Н.Б.	Sotsky M.B.
Классификации технических средств физической культуры и оценка	[Classifications of technical means of physical training and assessment
их эффективности на основе биомеханических принципов	of their effectiveness based on biomechanical principles of structuring
построения двигательных действий.	motor actions].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 40–48.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 40–48 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-40-48

Введение

Практически во всех областях человеческой деятельности применяются разнообразные технические устройства, способствующие как освоению двигательных действий, так и развитию различных качеств человеческого организма. Такие устройства часто называют тренажерами.

В спорте технические средства имеют очень широкое применение. Они способствуют развитию двигательных качеств (силы, выносливости, гибкости, ловкости), обеспечивают обучение сложным движениям, организуют страховку при выполнении рискованных элементов и т.д.

Под термином «технические средства» в спортивной педагогике понимаются «приборы, аппаратура, биотехнические и тренировочные устройства, тренажеры, измерительные и диагностические системы, предназначенные для оценки и развития умений, двигательных и интеллектуальных качеств» [1]; в данной монографии также предлагается тренировочным устройством называть техническое средство, которое обеспечивает выполнение заданного движения без специально организованного контроля (обратной связи). Аналогичное определение приводится в работе [2]. В ней речь идет о выполнении упражнений с заданными благодаря техническому средству усилиями и структурой движения также при отсутствии «контролирующего взаимодействия». В качестве тренажера чаще всего рассматривается устройство «для обучения и совершенствования спортивной техники, развития двигательных качеств, совершенствования анализаторных функций организма»; эффективность тренажера часто определяется именно наличием обратной связи [2].

В то же время на наличии обратной связи как обязательном атрибуте понятия «тренажер» не всегда акцентируется внимание, например в монографии [3] тренажер определяется как «комплекс устройств, позволяющих воспроизводить целостные упражнение или их основные элементы в специально созданных для этого искусственных условиях, обеспечивающих возможности регламентировать режимы выполняемых движений и их целесообразное изменение». В данном определении ключевым моментом является создание искусственной среды, работа в которой приводит к развитию соответствующих двигательных качеств, умений и навыков.

Существует несколько классификаций технических средств физической культуры и спорта.

В работе [4] предлагается в первую очередь разделять их по особенностям двигательной деятельности человека. В этом отношении можно выделить пять основных направлений. Это базовая физическая культура (ФК), профессионально-прикладная ФК, гигиеническая и рекреационная ФК, оздоровительно-реабилитационная ФК и спорт. Данная схема в соответствии с современной ситуацией может быть дополнена спортом для людей с ограниченными физическими возможностями (инваспорт).

Если классифицировать технические средства по использованию в спорте с учетом методической направленности, то в соответствии с рядом работ [1, 5-7] можно выделить четыре основные группы. Это устройства для образования двигательных навыков (обучающие), для формирования координации и ритма, тактических навыков, физических качеств, для сопряженного развития физических качеств и навыков, а также теоретической, психологической и профессионально-прикладной подготовки; приводятся варианты классификации, учитывающие конструктивные особенности технических средств. В работе [1] также отмечается, что существуют варианты разбиения технических средств на группы и по конструктивным особенностям. При этом выделяются некоторые характерные особенности или принципы, лежащие в основе создания и использования соответствующей конструкции. Так, устройства могут иметь блочную конструкцию, предполагать преодоление собственного веса, гидравлические и т.д. [5, 8]. Такая классификация не имеет четких границ между группами устройств. Например, блочное устройство может быть использовано в целом ряде ситуаций, которые следует отнести к различным группам. С его помощью можно изменять не только направление действия силы тяжести, но и характер усилия и для гидравлических устройств, и при использовании собственного веса. В такой классификации группы технических средств перекрываются, что вызывает сложность при отнесении их к тем или иным разделам классификации. Существует также разделение устройств и по тренировочному воздействию, где выделяется его конечная цель воздействия (например, лидирующие устройства, средства внесения помех, управляемого взаимодействия).

Приведенные примеры классификаций технических средств физической культуры и спорта хотя и являются вполне логичными, но недостаточно, на наш взгляд, отражают биомеханическую сущность процесса их использования для решения различных задач. В частности, с точки зрения классической биомеханики любое двигательное действие можно представить как единство трех блоков [9]: психоинформационного, физиологического и механического. Каждый из них описывается своими параметрами или координатами. Согласно подходу, предложенному в указанной работе, все три блока объединяются понятием цели физического упражнения. Она формируется в рамках психоинформационной сферы, что служит стимулом для упорядочения физиологических функций организма, в результате чего происходят мышечные сокращения, обеспечивающие механические движения в суставах и перемещение тела человека в пространстве в рамках конкретной двигательной задачи. Целью настоящей работы являлись построение классификации технических средств физической культуры на основе биомеханических принципов выполнения двигательных действий и разработка критериев их биомеханической эффективности в отношении силовой тренировки.

Основная часть

В соответствии с описанными выше биомеханическими закономерностями построения физических упражнений классификация технических средств физической культуры и спорта должна в первую очередь учитывать уровень конечного или целевого воздействия устройства – психоинформационный, физиологический и механический. Каждому из этих уровней должен быть присвоен соответствующий индекс 1, 2 и 3 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема воздействия внешних факторов на двигательную сферу человека с целью повышения ее эффективности (цифрами обозначены вводимые индексы)

Figure 1 – Diagram of impact of external factors on human motor sphere in order to increase its effectiveness (numbers indicate the input indexes)

Воздействовать на любой из конечных уровней построения движения можно как непосредственно, так и через другие уровни. Например, действуя через механику и задавая с помощью внешнего устройства форму двигательного действия, можно добиться образования умения и навыка на психоинформационном уровне и, наоборот, объясняя или показывая движение, например на видеозаписи, можно начинать освоение на уровне механики, т.е. собственно обучение реальному (не мысленному) движению. В соответствии с этим следующим нижестоящим звеном предлагаемой классификации должен являться уровень непосредственного или входного воздействия. Это один из тех же трех уровней, имеющих такую же индексацию, и через каждый из них можно воздействовать на любой вышестоящий.

Следующим звеном классификации должен служить способ воздействия технического сред-

ства на человека. К числу таких способов можно отнести механическую силу, поле или химическое вещество. Эти способы воздействия можно также обозначить индексами соответственно 1, 2 и 3. Естественно, число индексов для способов воздействия в рамках представленного подхода при необходимости можно увеличить, разделяя отдельные средства на группы.

В отношении полей следует отметить два основных варианта. Это использование силовых полей (гравитационного, электромагнитного) в качестве источника механической силы для создания тренировочного сопротивления, что позволяет свести данный случай к первой группе средств воздействия (силы механического происхождения). Устройства механического воздействия могут решать и информационные задачи, ограничивая через тактильное воздействие, пространственные перемещения звеньев тела человека при выполнении физического упражнения, например задавая амплитуду или правильное направление движению. В последнем случае для определения технического средства следует использовать набор индексов 1, 3, 1.

Другой вариант – это применение полей как средств передачи информации. Например, с помощью электромагнитного поля может быть передана информация обратной связи об уровне нагрузки сердечно-сосудистой системы, о достижении необходимой амплитуды суставного движения и т.д. Здесь также могут быть использованы акустические поля, например различного рода установки задания темпа, кардиолидеры. Устройства такого типа соответствуют набору индексов 1, 1, 2.

Если в качестве средства воздействия рассматривать химическое вещество, то конечной целью может служить любой из перечисленных уровней при непосредственном входе через физиологический. Использование введенной выше индексации, например, позволяет присвоить такому средству воздействия на психоинформационный уровень набор индексов 1, 2, 3. Такой механизм используется при употреблении допинга или других веществ, например анаболических стероидов.

При применении в физической культуре и спорте таких средств, как химические вещества, или поля информационного характера основные свойства существующих технических устройств вполне очевидны. Вместе с тем при использовании сил механического характера имеется ряд особенностей, связанных с их спецификой. Воздействие сил механического характера в соответствии с предложенной классификацией можно направить на любой из уровней построения двигательных действий (механический, физиологический или психоинформационный; индексы 1, 2, 3), при этом входным уровнем будет механический (индекс 3), а средством воздействия – механическая сила (индекс 1).

Если рассматривать в качестве объекта тренажерного воздействия силовые качества, то в описанной схеме эти устройства будут соответствовать конечному уровню воздействия – физиологическому, входному уровню – механическому, а в качестве средства воздействия использовать механические силы (индексы технического средства 2, 3, 1).

Учитывая тот факт, что силовые способности человеку нужны не в абстрактной форме, а применительно к определенной двигательной активности в спорте или в повседневной жизни, силовую тренировку и устройства для ее осуществления следует рассматривать с точки зрения биомеханических закономерностей формирования двигательных действий.

Двигательное действие человека с позиции биомеханики в соответствии с концепцией [9] может быть представлено в виде совокупности трех программ. Это программа места, описывающая перемещение общего центра масс, программа ориентации, представляющая информацию о вращении тела человека как целого во время двигательного действия, и программа позы, описывающая суставные движения, являющиеся основой реализации двух первых составляющих. Целенаправленные изменения позы человека позволяют обеспечить необходимые для выполнения двигательного действия управляющие силы и моменты сил.

В программе позы при выполнении конкретного физического упражнения подвижность в некоторых суставах должна быть ограничена вплоть до полной фиксации. Такие сочленения обеспечивают элементы динамической осанки. Они превращают опорно-двигательный аппарат человека в устойчивый механизм для достижения цели двигательного действия. В других суставах выполняются управляющие движения, обеспечивающие образование сил и моментов сил, приводящих к заданным целью физического упражнения перемещениям человека в пространстве.

Соединение элементов осанки и управляющих движений позволяет выполнить двигательное действие. Указанные составляющие являются необходимыми для успешного достижения цели физического упражнения.

Таким образом, если рассматривать силовые возможности, позволяющие эффективно реализовать двигательное действие, то их проявление следует рассматривать в контексте силового обеспечения элементов осанки и управляющих движений в суставах. Иными словами, для повышения результата упражнений, требующих проявления силы, необходимо развивать силовые качества мышц, реализующих элементы осанки и управляющие движения, а также в ходе такого развития добиваться координации их взаимодействия. Это касается сочетания элементов осанки с управляющими движениями, а также управляющих движений при работе одновременно нескольких сочленений.

Следует также отметить, что элементы осанки и управляющие движения имеют различный режим работы мышц, обеспечивающих выполнение суставных движений. В первом случае мышечное усилие направлено на ограничение подвижности или фиксацию суставного угла. Для второго типа составляющих характерен преодолевающий режим. Этот факт важно учитывать при построении или подборе упражнений, направленных на повышение эффективности выполнения конкретного двигательного действия.

Стремление к соблюдению эквивалентности условий проявления силовых качеств в соревновательном и тренировочном упражнениях позволяет выделить из массы всевозможных упражнений, выполняемых с внешним сопротивлением, специальные силовые упражнения, в которых имеется соответствие вышеуказанных условий, и общие, где главное – нагрузка мышц, обеспечивающих суставные движения без учета специфики их работы в конкретном двигательном действии.

В ходе построения специальных силовых упражнений должен соблюдаться принцип динамического соответствия, утверждающий, что любое специальное силовое упражнение должно соответствовать соревновательному по амплитуде и направлению движения, акцентируемому участку рабочей амплитуды движения, величине динамического усилия, быстроте проявления максимума усилия, режиму работы мышц [10].

Специальные силовые упражнения не только применяются при подготовке человека к специфическим движениям, но и используются в качестве общеразвивающих упражнений. В последнем случае особенностью является только наличие сопротивления без учета других параметров упражнения, связанных с принципом динамического соответствия.

Таким образом, эффективное средство силовой тренировки должно не только обеспечивать тренировочное сопротивление, но и сохранять при этом структуру суставных движений, характерную для реальных пространственных двигательных действий человека. Иными словами, одно из важнейших требований к эффективному техническому устройству или тренажеру, предназначенному для силовой тренировки, - это образование пространственного силового поля, воздействующего на звенья тела человека так, чтобы нагрузка могла распределяться на мышцы, обеспечивающие выполнение ряда одновременных движений, соответствующих нескольким степеням свободы его опорно-двигательного аппарата. Это требование должно рассматриваться в качестве важнейшего критерия биомеханической эффективности силового тренажера.

Другой особенностью тренажеров рассматриваемого типа является необходимость рассеивания механической энергии, циркулирующей в ходе выполнения упражнений. Поскольку в большинстве случаев силовые упражнения выполняются сериями [8], то каждое активное движение, например связанное с поднятием тренировочного отягощения, сопровождается приведением устройства или снаряда в исходное положение, что предполагает рассеивание кинетической и потенциальной энергии через опорно-двигательный аппарат тренирующегося. Такая ситуация очень часто нарушает динамическое соответствие упражнения реальным ситуациям двигательной активности человека. Так, если предполагается улучшить силовые качества для более эффективного толкания ядра, то серия упражнений сходной кинематической структуры с использованием блочного устройства имеет проблему раннего торможения движения для последующего возврата в исходное положение. Это только один из множества характерных примеров такого рода. В связи с этим необходимость рассеивания механической энергии в технических устройствах силовой тренировки также можно считать важным показателем эффективности тренажера.

Следует также отметить, что снаряды и отягощения, используемые в ходе силовой тренировки, а также перемещаемые элементы конструкций тренажеров обладают инерционными свойствами, определяемыми массами и моментами инерции, следовательно, оказывают инерционное сопротивление, зависящее от ускорения движущихся частей и грузов. На настоящем этапе развития спортивной науки отсутствуют методики определения таких инерционных силовых добавок, которые накладываются на основную (запланированную) нагрузку. Кроме этого, инерционность спортивных отягощений перекликается с рассмотренным выше требованием рассеивания механической энергии. Поэтому еще одним направлением повышения эффективности технических устройств и тренажеров силовой тренировки следует считать снижение масс и моментов инерции перемещаемых частей тренировочной конструкции.

Таким образом, нами предлагается в качестве показателей биомеханической эффективности технических средств силовой тренировки рассматривать коэффициент пространственности, связанный с количеством одновременно нагружаемых степеней свободы движения звена человека, непосредственно контактирующего с устройством, а также коэффициенты инерционности и рассеивания механической энергии, связанные с особенностями конструкции технического устройства.

пространственности (K_{dim}) Коэффициент можно ввести в виде отношения количества одновременно нагружаемых пространственных степеней свободы части технического устройства, непосредственно контактирующей с соответствующим звеном тела человека. Построение критерия эффективности здесь может исходить из того, что свободное твердое тело имеет шесть степеней свободы и звено тела человека, контактирующее с тренажером, может максимально иметь такое же количество степеней свободы, которые одновременно обеспечиваются нагрузкой. Поэтому за основу в данном случае следует взять отношение числа нагружаемых степеней свободы звена (N), взаимодействующего с техническим устройством, к максимально возможному, т.е. к числу «шесть»:

$$K_{dim} = \frac{N}{6}.$$
 (1)

Например, педаль велотренажера, контактирующая со стопой человека, имеет две степени свободы, причем нагрузкой обеспечена только одна. Коэффициент эффективности по данному устройству будет составлять 1/6 или приблизительно 17 %, аналогичный показатель будут иметь и большинство устройств стационарного типа для развития силы.

В отношении критерия инерционности (K_{in}) следует рассматривать разность единицы и отношения максимальной достигаемой в ходе упражнения кинетической энергии (E_{kin}) перемещаемых при выполнении упражнения масс к сумме указанной кинетической энергии и работ консервативных (A_k) и диссипативных (A_{dic}) сил:

$$K_{in} = 1 - \frac{E_{kin}}{E_{kin} + A_k + A_{dis}}.$$
(2)

В данном случае, если устройство использует только диссипативные и консервативные силы (например, растягивание резинового жгута в вязкой среде) и кинетическая энергия перемещаемых звеньев тела и частей устройства мала по сравнению с работой указанных сил, коэффициент приближается к максимальному значению, равному единице. В случае увеличения массы и моментов инерции, а также скорости перемещаемых элементов конструкции данный коэффициент имеет тенденцию к уменьшению, а в случае только инерционных сил (инерционное сопротивление горизонтально перемещаемой массы) приближается к минимальному значению, равному нулю.

В качестве коэффициента рассеивания (K_{dis}) механической энергии можно использовать отношение работы диссипативных сил (A_{dis}) к сумме работ, затраченных на преодоление диссипативных (A_{dis}) , консервативных (A_k) и инерционных сил:

$$K_{dis} = \frac{A_{dis}}{A_{dis} + A_k + E_{kin}}.$$
(3)

Здесь инерционные силы, как было предложено выше, могут быть оценены по максимальной кинетической энергии (E_{kin}), приобретаемой звеньями тела человека и перемещаемыми частями технического устройства во время выполнения упражнения. Максимальное значение данного коэффициента, равное единице, имеет место, если тренировочное сопротивление создается силами вязкости или трения. При использовании значительных величин консервативных и инерционных сил без специального торможения он уменьшается, отражая уменьшение эффективности рассеивания механической энергии.

Максимальное теоретическое значение биомеханической эффективности силового тренажера будет соответствовать трем единицам, а минимальное – стремиться к нулевым значениям для всех трех формул.

Для примера оценки биомеханической эффективности тренажерных систем, использующих различные способы создания тренировочной нагрузки, можно привести сравнение нескольких простейших технических средств, которые используются для силовой тренировки. Это упругий амортизатор (резиновый жгут), велотренажер с фрикционным способом создания сопротивления, гребной тренажер, использующий динамическое сопротивление воздушной среды, свободный вес и тренажер станочного типа, использующий преодоление силы гравитации.

Биомеханическая эффективность указанных средств силовой тренировки показана в виде диаграммы, изображенной на рисунке 2, где по вертикальной оси обозначены величины предложенных коэффициентов, а по горизонтальной – способы создания тренировочного сопротивления. Приведенная диаграмма представляет приблизительные значения коэффициентов, поскольку построена на основе теоретических рассуждений, предполагающих учет масс только перемещаемых элементов конструкции технического средства, пренебрежение силами трения в его шарнирных соединениях и блоках, и небольшими (в пределах 1–2 м/с) скоростями перемещаемых масс.



Рисунок 2 – Пример оценки коэффициентов биомеханической эффективности технических устройств для развития силы в зависимости от способа создания тренировочной нагрузки: белый цвет – коэффициент пространственности K_{dim} ; черный – коэффициент инерционности K_{in} ; серый – коэффициент рассеивания K_{dis}

Figure 2 – Example of estimated coefficients for biomechanical effectiveness of technical devices for strength development depending on the way of setting the training load: white – spatiality coefficient K_{dim} ; black – inertia coefficient K_{in} ; gray – energy dissipation coefficient K_{dis}

Так, велотренажер с фрикционным тормозным механизмом имеет максимальное значение по инерционности и рассеиванию энергии и небольшой коэффициент по пространственности. Свободный вес имеет максимальное значение по пространственности и невысокие показатели инерционности и рассеивания энергии. Гребной тренажер имеет максимальный показатель по рассеиванию энергии и инерционности при небольшой пространственности, а упругий амортизатор – максимум по инерционности при незначительных показателях пространственности и рассеивания.

Заключение

Существующие классификации технических средств физической культуры и спорта по их общему назначению, направленности воздействия, конструктивным особенностям недостаточно полно отражают биомеханические закономерности построения двигательных действий, что снижает возможности целенаправленного проектирования устройств развития качеств человека, необходимых для эффективного выполнения двигательных действий. В качестве биомеханической основы классификации технических средств физической культуры в соответствии закономерностями формирования двигательных действий предлагается использовать три уровня группировки устройств, первый из которых определяет область целевого воздействия устройства (психоинформационная, физиологическая или механическая), второй – три аналогичные области непосредственного воздействия и третий – перечень средств воздействия (механические силы, поля, химические вещества).

Для оценки биомеханической эффективности технических устройств развития силы с механическим характером сопротивления рекомендуется использовать новые, предложенные в статье показатели – коэффициенты пространственности, инерционности и рассеивания энергии, а в ходе разработки новых тренажерных систем данного назначения стремиться к возможности достижения высоких их значений.

Максимальную биомеханическую эффективность следует ожидать при разработке устройств, имеющих одновременно высокое значение коэффициентов пространственности, инерционности и рассеивания энергии, что предполагает использование устройств со многими степенями свободы, имеющих легкие конструкции и использующих диссипативные способы создания тренировочного сопротивления.

Список использованных источников

1. *Скрипко, А.Д.* Технологии физического воспитания / А.Д. Скрипко. – Минск : ИСЗ, 2003. – 284 с.

2. *Юшкевич, Т.П.* Тренажеры в легкой атлетике / Т.П. Юшкевич, А.В. Ворон ; Белорус. гос. ун-т. физ. культуры. – Минск : БГУФК, 2014. – 92 с.

3. *Ратов, И.П.* Двигательные возможности человека (нетрадиционные методы их развития и восстановления) / И.П. Ратов. – Минск, 1994. – 190 с.

4. Матвеев, Л.П. Теория и методика физической культуры (общие основы теории и методики физического воспитания; теоретико-методические аспекты спорта и профессионально-прикладных форм физической культуры) / Л.П. Матвеев. – М. : Физкультура и спорт, 1991. – 543 с.

5. *Siff, M.C.* Biomechanical Foundations of Strength and Power Training / M.C. Siff // Biomechanics in Sport: Perfomance Enhancement and Injury Prevention / V.M. Zatsiorsky ; ed. London Blackwell Science. – 2000. – P. 103–139.

6. *Лапутин, А.Н.* Технические средства обучения / А.Н. Лапутин, В.Л. Уткин. – М. : Физкультура и спорт., 1990. – 80 с.

7. *Евсеев, С.П.* Тренажеры в гимнастике / С.П. Евсеев. – М. : Физкультура и спорт, 2003. – 254 с.

8. Основы персональной тренировки / под ред. Р.В. Эрла, Т.Р. Бехеля : пер. с англ. И. Андреев. – Киев: Олимп. лит-ра, 2011. – 724 с.

9. *Назаров, В.Т.* Движения спортсмена / В.Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.

10. Верхошанский, Ю.В. Основы специальной силовой подготовки в спорте / Ю.В. Верхошанский. – 3-е изд. – М. : Советский спорт, 2013. – 216 с.

References

1. Skripko A.D. *Tekhnologii fizicheskogo vospitaniya* [Physical Education Technology]. Minsk, ISZ Publ., 2003, 284 p.

2. Jushkevich T.P. *Trenazhery v legkoi atletike* [Trainers in athletics]. Minsk, BGUFK Publ., 2014, 92 p.

3. Ratov I.P. *Dvigatel'nye vozmozhnosti cheloveka* [The motor abilities of a person]. Minsk, 1994, 190 p.

4. Matveev L.P. *Teoriya i metodika fizicheskoi kul'tury* [Theory and Methodology of Physical Education]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1991, 543 p.

5. Siff M.C. Biomechanical Foundations of Strength and Power Training. V.M. Zatsiorsky, ed. London Blackwell Science. *Biomechanics in Sport: Perfomance Enhancement and Injury Prevention*, 2000, pp. 103–139.

6. Laputin A.N., Utkin V.L. *Tekhnicheskie sredstva obucheniya* [Technical means of education]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1991, 80 p.

7. Evseev S.P. *Trenazhery v gimnastike* [Exercise equipment in the gymnastics]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 254 p.

8. Earle R.V., Baechle T.R. *Osnovy personal'noi trenirovki* [Fundamentals of special strength training in sports]. Kiev, Olimpiiskaya literatura Publ., 2011, 724 p.

9. Nazarov V.T. *Dvizheniya sportsmena* [Movement of the sportsman]. Minsk, Polymya Publ, 1984, 176 p.

10. Verhoshansky Y.V. Osnovy spetsial'noi silovoi podgotovki v sporte [Fundamentals of special strength training in sports]. Moscow, Sovetskii sport Publ., 2013, 216 p.

УДК 621.3.087.54

Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов

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

¹ОАО «Пеленг», ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь ²НИЦ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета, пр. Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

Поступила 15.11.2016 Принята к печати 06.01.2017

При изготовлении лазерных систем часто измеряют характеристики лазерного излучения по методу фокального пятна, для которого необходимо установить систему регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента. Целью данной работы являлась разработка нового принципа установки матричного фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента и лазерного излучателя для реализации предложенного метода в измерительном приборе.

В предложенном методе несколько пучков фокусируются положительной линзой, при этом оси падающих пучков параллельны ее оптической оси. Задача нахождения фокальной плоскости сводится к продольной подвижке фотоприемника для определения плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы и содержащей точку пересечения осей пучков. Лазерный излучатель построен на основе продольной диодной накачки и микрочип-конфигурации резонатора, особенностью которого является фокусировка излучения от каждого лазерного диода в отдельную зону активного элемента. За счет прокачки независимых областей активного элемента, для которых зеркала резонатора являются общими, реализуется генерация лазерных пучков с параллельными осями.

Теоретически показано, что при использовании современных анализаторов лазерного излучения обеспечивается определение положения фокальной плоскости с точностью не менее 1 %. Предложенный непрерывный лазер генерировал в спектральной области около 1 мкм два осесимметричных пучка с расходимостью около 10 мрад и Гауссовым профилем интенсивности, оси которых параллельны между собой. Регулировка тока питания лазерных диодов накачки позволяла изменять мощность каждого генерируемого пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик генерируемого излучения. Расстояние между генерируемыми пучками может варьироваться от 0,5 до 5 мм.

Предложен метод определения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента при использовании матричного фотоприемника и нескольких световых пучков, оси которых параллельны оптической оси фокусирующего компонента без применения дополнительных оптических устройств. Продемонстрирован лазерный излучатель для реализации предложенного метода в измерительном приборе, который не требует прецизионных механических устройств и значительно сократит время проведения измерения. Характеристики генерируемого излучения позволяют обеспечить определение положения фокальной плоскости с точностью не менее 1 %. Габаритные размеры излучателя составили 70 × 40 × 40 мм³, энергопотребление – менее 7 Вт на каждый пучок.

Ключевые слова: фокальная плоскость, фокусирующий компонент, оптическая ось, лазер, матричный фотоприемник.

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Ивашко А.М.	Ivashko A.M.
ОАО «Пеленг»,	JSC «Peleng»,
ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь	Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com	e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.	Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.
Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих	[Method for determination of focal plane location of focusing
компонентов.	components].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 49–54.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

Method for determination of focal plane location of focusing components

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

¹JSC «Peleng»,

Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus ²Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 15.11.2016 Accepted for publication 06.01.2017

Abstract

Mass-production of different laser systems often requires utilization of the focal spot size method for determination of output laser beam spatial characteristics. The main challenge of this method is high accuracy maintenance of a CCD camera beam profiler in the collecting lens focal plane. The aim of our work is development of new method for placing of photodetector array in the collecting lens focal plane with high accuracy.

Proposed technique is based on focusing of several parallel laser beams. Determination of the focal plane position requires only longitudinal translation of the CCD-camera to find a point of laser beams intersection. Continuous-wave (CW) diode-pumped laser emitting in the spectral region near 1µm was created to satisfy the requirements of the developed technique. Designed microchip laser generates two stigmatic Gaussian beams with automatically parallel beam axes due to independent pumping of different areas of the one microchip crystal having the same cavity mirrors.

It was theoretically demonstrated that developed method provides possibility of the lenses focal plane determination with 1% accuracy. The microchip laser generates two parallel Gaussian beams with divergence of about 10 mrad. Laser output power can be varied in the range of 0.1-1.5 W by changing the pumping laser diode electrical current. The distance between two beam axes can be changed in the range of 0.5-5.0 mm.

We have proposed method for determination of positive lens focal plane location by using of CCDcamera and two laser beams with parallel axes without utilization of additional optical devices. We have developed CW longitudinally diode pumped microchip laser emitting in the 1-µm spectral region that can be used in the measuring instrument that doesn't require precision mechanical components for determination of focal plane location with 1 % accuracy. The overall dimensions of laser head was $70 \times 40 \times 40$ mm³ and maximum power consumption was 7W per one laser beam.

Keywords: focal plane, focusing component, optical axis, laser, photodetector array.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Ивашко А.М.	Ivashko A.M.
ОАО «Пеленг»,	JSC «Peleng»,
ул. Макаенка, 25, Минск 220114, Беларусь	Makayonok str., 25, Minsk 220114, Belarus
e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com	e-mail: alex.ivashko.mail.by@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
Ивашко А.М., Кисель В.Э., Кулешов Н.В.	Ivashko A.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V.
Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих	[Method for determination of focal plane location of focusing
компонентов.	components].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 49–54.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 49–54 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-49-54

Введение

Измерение пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения, таких как расходимость и пространственное распределение плотности мощности в дальней зоне, является неотъемлемой частью процессов изготовления и испытания лазерных систем. Одним из наиболее распространенных методов измерения указанных характеристик лазерного излучения является метод фокального пятна [1, 2].

При подготовке к измерениям характеристик лазерного излучения по методу фокального пятна необходимо обеспечить коаксиальность осей лазерного пучка и измерительной оптической системы, отсутствие виньетирования, соответствие измерительной оптической системы спектральным и пространственно-энергетическим характеристикам проверяемого источника излучения и малые аберрации оптической системы. Также одним из существенных условий для корректного проведения измерения по методу фокального пятна является установка системы регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента.

Установку системы регистрации в фокальной плоскости фокусирующего компонента можно обеспечить несколькими способами [3]: по удаленному предмету; методом автоколлимации; с помощью плоскопараллельной пластинки и дополнительной зрительной трубы. На практике часто применяют метод измерения рабочих расстояний от базовых поверхностей, частным случаем которого является измерение заднего фокального отрезка [4]. В некоторых случаях можно воспользоваться установкой системы регистрации в расчетное положение с конструктивной точностью.

Наиболее распространенным методом нахождения положения фокальной плоскости является использование дополнительного коллиматора. Фокусирующий компонент с фотоприемником устанавливается напротив дополнительного коллиматора с известными характеристиками, в фокальной плоскости которого находится тест-объект (обычно штриховая мира, которая равномерно освещена в требуемом спектральном диапазоне). Суть метода сводится к продольной подвижке фотоприемника относительно фокусирующего компонента до получения резкого изображения тест-объекта. Для получения высокой точности установки фотоприемника необходимо, чтобы фокусное расстояние дополнительного коллиматора превышало фокусное расстояние фокусирующего компонента в 3–5 раз [3]. Общий принцип применения дополнительного коллиматора используется и в ряде других способов определения положения фокальной плоскости объектива [5–7].

Особенностью всех указанных выше методов является использование дополнительных оптических устройств либо косвенное определение положения фокальной плоскости, что не всегда возможно и допустимо.

Целью данной работы являлась разработка нового метода установки матричного фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента при измерении характеристик лазерного излучения по методу фокального пятна непосредственно на месте проведения измерений для случая отсутствия дополнительных оптических устройств с известными характеристиками в спектральном диапазоне работы лазерного источника излучения, а также разработка миниатюрного лазерного излучателя, который значительно сократит время определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов по предложенному методу, что позволит реализовать его в виде измерительного прибора.

Способ определения положения фокальной плоскости

Фокус идеальной оптической системы является изображением бесконечно удаленной точки, которая принадлежит пучку лучей, параллельных оптической оси системы [8]. Другими словами, параллельные оптической оси лучи пересекутся в фокусе после прохождения оптической системы. Следовательно, если на оптическую систему падает несколько световых пучков, оси которых параллельны оптической оси системы, то после ее прохождения оси пучков пересекутся в фокусе. Таким образом, задача нахождения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента сводится к продольной подвижке фотоприемника для определения плоскости, перпендикулярной оптической оси этого компонента и содержащей точку пересечения осей пучков.

Рассмотрим с точки зрения геометрической оптики случай падения на тонкую положительную линзу двух световых пучков с симметричным распределением интенсивности относительно собственной оси каждого из пучков. Оси падающих пучков симметричны относительно оптической оси фокусирующего компонента и параллельны ей (рисунок 1).



Рисунок 1 – Определение положения фокальной плоскости фокусирующего компонента

Figure 1 – Determination of focal plane position of focusing component

Из подобия треугольников *ABF*' и *A*'*B*'*F*' следует:

$$d/d' = f'/\Delta f', \tag{1}$$

где d – расстояние между осями пучков до оптической системы; d' – расстояние между осями пучков в плоскости фотоприемника; f' – фокусное расстояние фокусирующего компонента, $\Delta f'$ – погрешность установки фотоприемника в фокальную плоскость фокусирующего компонента.

Для большинства практических применений достаточная точность определения положения фокальной плоскости составляет 1 % от величины фокусного расстояния [4]. Следовательно, формулу (1) можно преобразовать как:

$$d = 100d^{2}$$
. (2)

Теоретическое минимальное значение *d*['] определяется разрешающей способностью матричного фотоприемника. Однако при одновременной засветке несколькими световыми пучками вблизи фокальной плоскости фокусирующего компонента происходит наложение пучков друг на друга, что приводит к суммированию интенсивностей. Поэтому определение положения оси каждого из пучков в области перекрытия является достаточно сложной задачей. В то же время, если засвечивать фотоприемник световыми пучками поочередно, нахождение оси каждого из пучков не вызывает затруднений и точность определения положения оси стремится к теоретической. Возникает только необходимость отмечать и запоминать положения осей при переключении от одного пучка к другому. Принципиально того же результата можно добиться используя один и тот же световой пучок. Для этого необходимо обеспечивать его параллельное смещение в направлении, перпендикулярном оптической оси фокусирующего компонента.

Для измерения характеристик лазерного излучения применяются матричные фотоприемники со специализированным программным обеспечением (анализаторы пучка), позволяющие пространственно-энергетические определять характеристики падающего светового пучка с высокой точностью. Для матричного анализатора пучка Ophir SP620 погрешность определения размеров световых пучков не превышает 2 % [9]. Например, при использовании стигматического лазерного пучка с расходимостью 10 мрад, в фокальной плоскости линзы с f '= 100 мм размер пучка составит приблизительно 1 мм. Соответственно, погрешность определения размеров пучка и положения его энергетического центроида (оси пучка) не превысит 20 мкм. По формуле (2) требуемое расстояние между осями пучков d(величина их относительного смещения) для обеспечения точности в 1 % определения положения фокальной плоскости составит 4 мм или ±2 мм относительно оптической оси фокусирующего компонента, что достаточно легко реализуется.

Лазерный излучатель

Описанный выше принцип определения положения фокальной плоскости может быть ис-

пользован для создания коммерческих измерительных систем. Однако использование смещения светового пучка или нескольких источников излучения значительно усложнит конструкцию, увеличит время проведения измерения и габаритные размеры прибора. Устранить указанные недостатки может разработанный авторами данной статьи непрерывный твердотельный лазерный излучатель с генерацией двух лазерных пучков, оси которых параллельны между собой. Принципиальная схема излучателя приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Принципиальная схема излучателя: 1 – лазерный диод; 2 – оптическая система накачки; 3 – активный элемент

Figure 2 – Principle scheme of laser: 1 – laser diode; 2 – pump optics; 3 – active element

Излучение двух лазерных диодов накачки 1 с помощью оптической системы 2 фокусируется в активном элементе 3. В качестве активного элемента 3 использовался кристалл Yb:YAG с концентрацией активных центров 10 ат.%. В качестве источников накачки использовались лазерные диоды с волоконным выводом излучения, каждый из которых обеспечивался независимым питанием.

Особенностью разработанного лазера является схема накачки, которая позволяет фокусировать излучение от каждого лазерного диода в отдельную зону активного элемента. За счет прокачки отдельных, пространственно независимых друг от друга областей активного элемента в совокупности с микрочип конфигурацией резонатора, зеркала которого являются общими для всех прокачиваемых зон и нанесены на рабочие торцы активного элемента (непараллельность торцов не превышает 5 угл. сек.), реализуется генерация двух лазерных пучков, оси которых параллельны друг другу. Варьировать расстояние между осями генерируемых пучков в разработанной системе можно от 0,5 до 5 мм путем изменения расстояния между волоконными выводами лазерных диодов и за счет изменения параметров системы накачки, при этом оси генерируемых пучков будут оставаться параллельными даже при случайном наклоне оси излучения накачки.

Длина волны генерируемого излучения составляет 1,03 мкм, опционально возможно увеличение длины волны генерации до 1,05 мкм. Для каждого пучка характерно Гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении (рисунок 3) при расходимости около 10 мрад.



Рисунок 3 – Пространственный профиль отдельного генерируемого лазерного пучка

Figure 3 – Spatial shape of single laser beam

За счет изменения параметров питания соответствующего лазерного диода накачки можно варьировать мощность отдельного лазерного пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик излучения.

Лазер характеризуется малыми габаритными размерами (70 × 40 × 40 мм³), высокой надежностью и низким энергопотреблением (менее 7 Вт на каждый пучок), что также немаловажно при создании измерительных приборов. Разработанная схема лазера позволяет увеличить количество диодов накачки и, соответственно, количество генерируемых лазерных пучков, что позволяет расширить возможности практического применения излучателя.

Заключение

Предложен метод определения положения фокальной плоскости фокусирующего компонента при использовании матричного фотоприемника и одного поперечно смещаемого либо нескольких стационарных световых пучков, оси которых параллельны оптической оси фокусирующего компонента без применения дополнительных оптических устройств. Теоретически показано, что при использовании современных анализаторов лазерного излучения можно обеспечить определение положения фокальной плоскости с точностью 1 %.

Для реализации предложенного принципа определения положения фокальной плоскости в виде измерительного прибора продемонстрирован непрерывный лазерный излучатель с диодной накачкой с генерацией на длине волны 1,03 мкм либо 1,05 мкм двух осесимметричных лазерных пучков с расходимостью 10 мрад и Гауссовым профилем интенсивности, оси которых параллельны между собой. Каждый лазерный диод накачки обеспечивается независимой регулировкой тока питания, что позволяет изменять выходную мощность каждого генерируемого пучка от 100 мВт до 1,5 Вт при сохранении пространственных характеристик генерируемого излучения. В лазере реализовано изменение расстояния между генерируемыми пучками от 0,5 до 5 мм. Габаритные размеры составляют 70 × 40 × 40 мм³, энергопотребление – менее 7 Вт на каждый пучок.

Разработанный лазерный излучатель не требует прецизионных механических устройств и значительно сократит время проведения измерения. Схема лазера также позволяет увеличить количество диодов накачки для расширения возможностей его практического применения.

Список использованных источников

1. *Eichler, J.* Laser / J. Eichler. – Berlin : Springer-Verlag, 2006. – 440 c.

2. *Paschotta, R*. Field Guide to Lasers / R. Paschotta. – Washington : SPIE, 2008. – 140 c.

3. *Афанасьев*, *В.А.* Оптические измерения / В.А. Афанасьев ; под ред. Д.Т. Пуряева. – 3-е изд. – М. : Высш. школа, 1981. – 229 с.

4. *Креопалова, Г.В.* Оптические измерения / Г.В. Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев ; под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М. : Машиностроение, 1987. – 264 с.

5. Способ определения положения фокальной плоскости объектива и устройство для его

осуществления : а. с. 1080053 СССР, МКИ5 G 01 M 11/00 / П.А. Санников ; № 3369921 ; заявл. 25.12.81; опубл. 15.03.84 // Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий. – 1984. – № 10. – 4 с.

6. Способ определения положения фокальной плоскости объектива : а. с. 1585703 СССР, МКИ5 G 01 М 11/02 / О.В. Рожков, А.П. Тимашов, Л.Н. Тимашова, А.П. Мальков, Л.А. Борис ; № 4602705 ; заявл. 05.11.88; опубл. 15.08.90 // Государственный комитет по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР. – 1990. – № 30. – 4 с.

7. Устройство для контроля положения фокальной плоскости объектива : а. с. 1643972 СССР, МКИ5 G 01 М 11/00 / И.М. Прибыловский ; № 4656918 ; заявл. 24.01.89 ; опубл. 23.04.91 // Государственный комитет по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР. – 1991. – № 15. – 3 с.

8. Заказнов, Н.П. Теория оптических систем / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

9. Laser Power & Energy Measurement. Laser Beam Analysis : каталог (англ.). – OPHIR Photonics, 2015. – 250 с.

References

1. Eichler J. Laser. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 440 p.

2. Paschotta R. Field Guide to Lasers. Washington, SPIE, 2008, 140 p.

3. Afanasiev V.A. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moskow, Vysshaya shkola Publ., 1981, 229 p.

4. Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puriaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moskow, Mashinostroenie Publ., 1987, 264 p.

5. Sannikov P.A. *Sposob opredeleniya polozheniya fokal'noi ploskosti ob''ektiva i ustroistvo dlya ego osu- shchestvleniya* [Method and device for determination of focal plane position]. Patent USSR, no. 1080053, 1984.

6. Rozkov O.V., Timashov A.P., Timashova L.N., Mal'kov A.P., Boris L.A. *Sposob opredeleniya polozheniya fokal'noi ploskosti ob'ektiva* [Method of determining of focal plane of objective]. Patent USSR, no. 1585703, 1990.

7. Pribilovskiy I.M. *Ustroistvo dlya kontrolya polozheniya fokal'noi ploskosti ob'ektiva* [Device for control of position of focal plane of lens]. Patent USSR, no. 1643972, 1991.

8. Zakaznov N.P., Kiriyshin S.I., Kyzichev V.I. *Teoriya opticheskikh sistem* [Optical systems theory]. Moskow, Mashinostroenie Publ., 1992, 448 p.

9. Laser Power & Energy Measurement. Laser Beam Analysis [product catalogue]. OPHIR Photonics Publ., 2015, 250 p.

Refractive index determination for a plane dielectric layer using the measurements of transmitted beam intensity

Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.

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

Received 26.07.2016 Accepted for publication 10.01.2017

Abstract

The aim of the present work is the theoretical justification of new refractive index determination technique for a homogeneous transparent plane dielectric layer. It uses intensity measurements for two polarizations of transmitting electromagnetic beam and does not take into consideration phase relationships and phase parameters of testing field at unknown thickness of a layer.

For this purpose, the layer transmission energy coefficients for two linear polarizations of an electromagnetic beam, orthogonal and parallel to the plane of incidence, are studied to be dependent on the layer thickness and its refractive index. We have found the function of energy transmission coefficients for these polarizations, which does not depend on the layer thickness and is characterized by monotonic dependence on its refractive index.

It is shown that this function provides the opportunity to determine the layer refractive index uniquely. It can be made analytically using the inverse function, and also with the help of experimental calibration technique for the initial function. The influence of losses on the method efficiency is investigated, and it is established, that the presence of absorption causes appearance of separated zones of refractive index variation, where the method becomes inoperative. However, at absorption index values of the order of 10^{-5} the method can be applied, but in the bounded domain of refractive index variation.

So, it is established that the proposed methods provides the opportunity to determine the refractive index of a plane dielectric layer under conditions of low and null value of absorption using the intensity measurements for two orthogonal polarizations of transmitting electromagnetic radiation.

Keywords: refractive index measurement, energy transmission coefficients, transparent dielectric, low absorption.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Сердюк В.М.	Serdyuk V.M.
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	Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: serdyukvm@bsu.by	e-mail: serdyukvm@bsu.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.	Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.
Refractive index determination for a plane dielectric layer	Refractive index determination for a plane dielectric layer
using the measurements of transmitted beam intensity.	using the measurements of transmitted beam intensity.
Приборы и методы измерений.	<i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements].
2017. – Т. 8, № 1. С	2017, vol. 8, no. 1, pp. 55–60
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60

Определение показателя преломления плоского диэлектрического слоя методом измерения интенсивностей проходящих пучков

Сердюк В.М., Титовицкий И.А.

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

Поступила 26.07.2016 Принята к печати 10.01.2017

Целью работы является теоретическое обоснование нового метода определения показателя преломления однородного прозрачного плоского диэлектрического слоя по измерению интенсивности двух поляризаций проходящего пучка электромагнитного излучения без учета фазовых соотношений и фазовых параметров тестирующего поля при неизвестной толщине слоя.

Для этого рассматривались энергетические коэффициенты прохождения слоя для двух линейных поляризаций пучка электромагнитного излучения, перпендикулярной и параллельной плоскости падения, и изучались их зависимости от показателя преломления слоя и его толщины. Найдена функция энергетических коэффициентов прохождения двух разных поляризаций, которая не зависит от толщины слоя и характеризуется монотонной зависимостью от его показателя преломления.

Показано, что применение данной функции позволяет однозначно определить искомый показатель преломления слоя по измерениям интенсивностей двух ортогональных поляризаций проходящего излучения. Это можно сделать аналитически, используя обратную функцию, а также с помощью экспериментальной калибровки исходной функции. Изучено влияние поглощения на эффективность применения метода и установлено, что его присутствие вызывает появление отдельных зон изменения показателя преломления, где метод перестает работать. Однако если его величина не превышает значений порядка 10⁻⁵, то метод может применяться, но уже в ограниченном интервале изменения показателя преломления.

Таким образом, доказано, что предлагаемый метод дает возможность определять показатель преломления диэлектрического слоя в условиях малого и нулевого поглощения по измерениям интенсивностей проходящего электромагнитного излучения двух ортогональных поляризаций.

Ключевые слова: измерение показателя преломления, энергетический коэффициент прохождения, прозрачный диэлектрик, малое поглощение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60

	Addungs for conversion day on
Аорес оля переписки:	Address for correspondence:
Сероюк В.М.	Serdyuk V.M.
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	Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: serdyukvm@bsu.by	e-mail: serdyukvm@bsu.by
	For citation:
Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.	Serdyuk V.M., Titovitsky J.A.
Refractive index determination for a plane dielectric layer	Refractive index determination for a plane dielectric layer
using the measurements of transmitted beam intensity.	using the measurements of transmitted beam intensity.
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. C. 55–60.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 55–60
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-55-60

Introduction

The problem of refractive index measurement for various dielectric materials and substances is of great importance for all fields of science and industry, which use and study the phenomenon of electromagnetic waves propagation through matter [1-3]. For its solving, one applies various techniques. There are refractometric ones (using also the phenomenon of total internal reflection) [1, 2–4], interferometric methods (utilizing the phase relationships between various coherent fields after transmission and reflection from the testing material) [1, 2, 5, 6] and others [7-9]. This topic acquires new importance last years due to development of study of heterogeneous disperse systems, i.e. materials produced by macro- and microparticles of different phases having developed interfaces (soils, clouds, food-stuffs, cosmetic products, building, wood, paper materials and so on) [10, 11]. Using measurements of averaged dielectric permittivity for such materials under various conditions and over various regions of electromagnetic radiation, one can investigate their physical properties, for instance, concentration and relative position of compounding phases, physical state and etc (see, for example, [11]).

Among the collection of refractive index determination techniques one can highlights the ellipsometric ones [8], which allows for solving the problem of refractive index determination for various homogeneous and layered media in the wide region of electromagnetic spectrum at unknown thickness of different layers. The name of the technique reveals its essence, when sought parameters of tested medium are determined by measurements of polarization ellipse parameters for reflected or transmitted beam. However, the ellipsometric technique produces low accuracy at very small absorption [12], besides, it uses complicated algorithm of refractive index computation. In the present work, we present an additional method of this index determination for transparent and low absorbing plane materials, based on field intensity measurements without taken into account phase relationships, but distinguished by simplicity of realization. It uses results of intensity measurements for two transmitting orthogonal polarizations, parallel and orthogonal to the plane of beam incidence, and employs simple analytical equations at determining sought refraction index and does not require additional information about thickness of a medium and another its physical properties.

Description of the method

Let a beam of electromagnetic radiation of the frequency ω be incident on a plane dielectric layer of the thickness h. As it is known, for two orthogonal polarizations of a plane wave, the amplitude transmission coefficient for a dielectric layer is determined by the expression [13–15]:

$$T_{H,E} = D^{-1} T_{vd} T_{dv} \exp(ik\gamma h), \qquad (1)$$

where $i = (-1)^{1/2}$ is the imaginary unite; $k = \omega/c$ is the wavenumber;

$$D = 1 - R_{vd}^2 \exp(2ik\gamma h),$$

 R_{vd} , T_{vd} and T_{dv} are the amplitude coefficients of plane wave reflection and refraction on the plane boundaries «air (vacuum) – dielectric» and «dielectric – air»:

$$R_{vd} = \frac{\varepsilon^{\theta}\beta - \gamma}{\varepsilon^{\theta}\beta + \gamma}; \quad T_{vd} = \frac{2\beta}{\varepsilon^{\theta}\beta + \gamma}; \quad T_{dv} = \frac{2\varepsilon^{\theta}\gamma}{\varepsilon^{\theta}\beta + \gamma};$$

(the Fresnel formulae), written in terms of the normal propagation parameters [12–15]. Here, ε is the dielectric permittivity of layer material at the frequency of incident radiation, $\beta = \cos\varphi$ and $\gamma = (\varepsilon - 1 + \beta^2)^{1/2}$ are the parameters of normal propagation for a plane wave in air and in a dielectric, respectively, φ is the angle of wave incidence on the surface of a dielectric layer, $\theta = 0$ for the H (or TE) polarization of incident wave, when its electric vector is orthogonal to the plane of incidence, and $\theta = 1$ for the E (or TM) polarization, whose electric vector lies in this plane.

Usually, the Fresnel formulae are derived theoretically for incident field presented by a plane electromagnetic wave, i.e. for monochromatic radiation with determined direction of propagation in space [12–15]. However, scientific experience show, that as these formulae, as the formula (1) are valid for more general case, when radiation is presented by a spatially bounded beam or by superposition of waves with various frequencies from narrow bounded frequency region. Then, for the temporal ω and spatial β frequencies of propagation, one takes averaged values of these parameters over the temporal and spatial (angular) spectrum of incident field (see, for example, [16]).

The expression (1) can be transformed to the form:

$$T_{H,E} = \left[\cos k\gamma h - i(2\varepsilon^{\theta}\beta\gamma)^{-1}(\varepsilon^{2\theta}\beta^{2} + \gamma^{2})\sin k\gamma h\right]^{-1}.$$
 (2)

Assume that a layer is transparent, i.e. the permittivity ε is real number. Then, the parameter γ of wave propagation inside a layer is also real number, and the coefficient of energy transmission through the layer, which equals to the squared absolute value of the amplitude coefficient (2), is determined by the equation:

$$|T_{H,E}|^{2} = \left[1 + (2\varepsilon^{\theta}\beta\gamma)^{-2}(\varepsilon^{2\theta}\beta^{2} - \gamma^{2})^{2}\sin^{2}k\gamma h\right]^{-1}.$$
 (3)

The plots on Figure 1 demonstrate the dependence of the energy transmission coefficients (3) on the refractive index of a layer. From here one can see that this dependence is almost periodic.



Figure 1 – Energy coefficients of transparent dielectric layer transmission for two various polarizations of incident radiation $|T_{H}|^{2}$ (curve 1) and $|T_{E}|^{2}$ (curve 2) as functions of the refractive index n of a layer at its thickness h = 0.75 λ , when the angle of incidence $\varphi = 30^{\circ}$

The analogous dependences on the layer thickness are wholly periodic with the small period. This circumstance is inhibitory to solve an inverse problem of refractive index determination for a testing dielectric layer over the wide region, if one can use the energy transmission coefficient only of one polarization. However, using of data on measuring of such coefficients for two different polarizations, provides the opportunity to solve this problem independently on the layer thickness, like it made in [17, 18] for determining of the absorption coefficient using the amplitude coefficients of reflection and refraction. Note that in the values $|T_H|^2$ and $|T_E|^2$ (3), one can construct the function, which is not dependent on the thickness:

$$f(T_H, T_E) = \frac{g(T_H)}{g(T_E)} = \frac{\varepsilon}{\beta^2(\varepsilon+1) - 1},$$
(4)

where:

$$g(T_{H,E}) = \left(|T_{H,E}|^{-2} - 1 \right)^{1/2}.$$
(5)

The obtained simple equation allows for calculation of the refractive index for a dielectric layer using numerical value of the function (4):

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \left(\frac{(1-\beta^2)f(T_H, T_E)}{\beta^2 f(T_H, T_E) - 1}\right)^{1/2}$$
(6)

It is obvious that the case of normal incidence on a layer ($\varphi = 0$) is excluded here, because in this case $\beta = 1$, and the energy transmission coefficients (1), (2) for two orthogonal polarizations are equal one to the other.

Figure 2 demonstrates the dependences of functions $f(T_H, T_E)$ (4) and $g(T_{H,E})$ (5) on the refractive index of a layer. The first of them is monotonic, what provides the opportunity to use that for refractive index determination as by the method of experimental calibration directly on a curve, as using analytical technique according equation (6) (the corresponding curve is also shown on Figure 2).



Figure 2 – Dependence of functions $g(T_H)$ (curve 1), $g(T_E)$ (curve 2), $f(T_H, T_E)$ (curve 3) and $n(f(T_H, T_E))$ (curve 4), computed by (5), (4) and (6), on the refractive index *n* of a transparent dielectric layer, when its thickness $h = 0.75\lambda$ and the angle of incidence $\varphi = 30^{\circ}$

The inclination angle for the curve, depicting the function $f(T_H, T_E)$ (4), decreases under increase of the refractive index, what corresponds to decrease of sensitivity of the discussed technique. To improve its sensitivity and decrease calculation error at great values of the refractive index, one can increase the angle of incidence for radiation on the surface of the testing layer. Under increase of this angle, the difference between transmission coefficients for various polarizations (3) increases, what causes to increase of derivative value for the curve, representing the function (4).

Up to here, we have considered the case of a perfectly transparent testing layer at the absence of absorption. Now consider the influence of lowabsorption on the opportunity to solve the inverse problem of refractive index determination using energy transmission coefficient measurements for various polarizations. On Figure 3, the plots of the functions $g(T_{H,E})$, $f(T_H, T_E)$ and $n(f(T_H, T_E))$, calculated by equations (4), (5), (6) and (2), are shown for the case, when the absorption coefficient is not vanish: $\kappa = 2.0 \times 10^{-5}$ ($\varepsilon = (n + i\kappa)^2$). In this case, the function $n(f(T_H, T_E))$, as before, regenerates linearly growth of the refractive index, with the exception of several narrow regions of anomalous behavior of the pointed functions, where the magnitudes of transmission coefficients (2) for various polarizations reach their maximum values.



Figure 3 – Dependence of functions $g(T_H)$ (curve 1), $g(T_E)$ (curve 2), $f(T_H, T_E)$ (curve 3) and $n(f(T_H, T_E))$ (curve 4), computed by (5), (4) and (6), on the refractive index n of a low-absorbing dielectric layer, when its thickness $h = 0.75\lambda$, the absorption index in a layer $\kappa = 2.0 \times 10^{-5}$ and the angle of incidence $\varphi = 30^{\circ}$

Here, the real part of the sine of $k\gamma h$ equals or almost equals to zero, and then the contribution of components caused by the imaginary part of ε and γ to (2), becomes noticeable. If it is necessity to carry out the measurements directly in one of these anomalous regions, we can shift them, changing the angle of incidence, whose value depends on their position, so that the energy transmission coefficient of the *E* polarization to be essentially differs from the unite. Hence, the proposed technique can be applied also in the case of low-absorption.

Under increase of absorption in a layer, anomalous regions become wider, and even at $\kappa \approx 1.0 \times 10^{-3}$ they annex in the aggregate all region of refractive index change, so that the pointed algorithm stops to work under real conditions. Besides, usually in practice the coefficient of absorption in material is also unknown parameter, which should be determined together with the refractive coefficient, so that two measured parameters (the energy transmission coefficients) can occur not sufficient for correct solving of corresponding equations, which include also unknown thickness of a layer.

Conclusion

Studying the dependence of energy transmission coefficients of a plane transparent dielectric layer on its thickness and refractive index, we have established that, using two transmission energy coefficients for two orthogonal polarizations of inclined incidence electromagnetic beam, one can form a function, which monotonically depend on the refractive index of a layer over wide domain of its variation and does not depend on the layer thickness. Application of this function provides the opportunity to solve the inverse problem of refractive index determination on measurements of field intensities and using the laver energy transmission coefficients under conditions of incoherent beam and of unknown physical parameters of a dielectric layer. For solving this problem, one can applied the analytical method of inverse function computation, or can utilize the direct experimental calibration method for initial function. It emerges that accuracy of the method using calibration function depends on the value of the angle of beam incidence on a layer. If the refractive index value varies over the range from 1 to 2, then one can use the small incident angle of 30°, but for more great values of refractive index (from 2 up to 4 and more), it is appropriate to increase this angle up to the value of 60°. Using the analytical method of inverse function computation, the refractive index can be computed with any degree of accuracy, hence, accuracy of the presented method on the whole is determined by the measurement accuracy for electromagnetic radiation intensity.

So, in the present work, an unconventional technique of refractive index determination for a transparent dielectric layer on measurement of transmitting electromagnetic beam intensity is proposed. It differs from another techniques by the object of measurements, when one measures intensities of two linear polarizations of transmitting beam, which are orthogonal and parallel to the plane of its incidence, and distinguishes by simplicity of the analytic formulae (4) and (6), using for refractive

index determination with the help of results for these intensity measurements without taken into account and introducing any phase field parameters.

The presence of absorption in a layer has very negative influence on application efficiency of the proposed method of refractive index determination. Even weak absorption produces appearance of narrow anomalous zones, where the dependence of the function being considered on refractive index is not monotonic. Distance between them is about 0.4-0.7 of refractive index value, and their width is equal to 0.1-0.3 for the absorption index κ having the order of 10^{-5} and 10^{-4} . It allows us to use the proposed method of refractive index determination also under presence of absorption, but over narrow domain of its variation. If necessary, the position of anomalous zones can be shifted away from the assuming domain of refractive index variation by changing the angle of beam incidence on a layer. However, at the growth of absorption up to $\kappa \approx$ 10⁻³ and more, the width of anomalous zones of monotonicity violation appreciably increases, and the method becomes to be practically inapplicable. In this case, substantial modification of the proposed method is required to take into consideration complexity of electromagnetic field propagation parameters in a dielectric.

References

1. Singh S. Refractive index measurement and its applications. *Physica Scripta*, 2002, vol. 65, no. 2, pp. 167–180.

2. Meeteen G.H. Refractive index measurement. CRC Press, 1999, 11 p.

3. Sokolov V.I., Marusin N.V., Panchenko V.Ya., Savelyev A.G., Seminogov V.N., Khaydukov E.V. Determination of refractive index, extinction coefficient and thickness of thin films by the method of waveguide mode excitation. *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no 12, pp. 1149–1153.

doi: org/10.1070/QE2013v043n12ABEH015272

4. Astrua M., Pisani M. Prism refractive index measurement at INRiM. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 9, paper no. 095305.

5. Chiu M.-H., Lee J.-Y., Su D.-C. Complex refractiveindex measurement based on Fresnel's equations and the uses of heterodyne interferometry. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, no. 19, pp. 4047–4052.

6. Choi H.J., Lim H.H., Moon H.S., Eom T.B., Ju J.J., Cha M. Measurement of refractive index and thickness of transparent plate by dual-wavelength interference. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 9, pp. 9429–9434.

7. Ayupov B.M., GritsenkoV.A., Wong H., Kim C.W. Accurate Ellipsometric Measurement of Refractive Index and Thickness of Ultrathin Oxide Film. *Journ. Electrochem. Soc.*, 2006, vol. 153, issue 12, pp. F277– F282. **doi:** 10.1149/1.2357717

8. Azzam R., Bashara N. Ellipsometry and polarized light. Amsterdam, North Holland, 1977, 548 p.

9. Brindza M., Flynn R.A., Shirk J.S., Beadie G. Thin sample refractive index by transmission spectroscopy. *Opt. Express*, 2014, vol. 22, no. 23, pp. 28537–28552. **doi:** 10.1364/OE.22.028537| OPTICS EXPRESS 28537

10. Kupfer K. (ed.) Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Berlin, Springer, 2005, 530 p.

11. Serdyuk V.M. Dielectric study of bound water in grain at radio and microwave frequencies. *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, vol. 84, pp. 379–406.

12. Kizel V.A. *Otrazhenie sveta* [Light reflection]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 352 p. (in Russian).

13. Born M., Wolf E. Principles of Optics. 7th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1999, pp. 38–53.

14. Chew W.C. Waves and fields in inhomogeneous media. New York, IEEE Press, 1995, 608 p.

15. Ishimaru A. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering. Engelwood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991, 637 p.

16. Serdyuk V.M., Titovitsky J.A. A simple analytic approximation for the refracted field at Gaussian beam incidence upon a boundary of absorbing medium. *Journ. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2010, vol. 2, no. 11, pp. 640–648. **doi:** 10.4236/jemaa.2010.211084

17. Hishikawa Y., N. Nakamura, Studa S., Nakano S., Kishi Y., Kuwano Y. Interference-free determination of the optical absorption coefficient and the optical gap of amorphous silicon thin films. *Jap. Journ Appl. Phys.*, 1991, vol. 30, no. 5, pp. 1008–1014.

18. Bhattacharyya D., Bhattacharyya S.K., Chaudhuri S., Pal A.K. Determination of refractive index of thin films beyond the absorption edge. Vacuum, 1993, vol. 44, issue 10, pp. 979–981. **doi:** 10.1016/0042-207X(93)90282-F

УДК 620.16

Анализ дефектов поверхности исходных подложек алюминия и его сплавов методом сканирующего зонда Кельвина

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Мухуров Н.И.², Шаронов Г.В.³, Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь ²Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», пр. Независимости, 68, г. Минск 220072, Беларусь ³Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 12.01.2016 Принята к печати 14.02.2017

В настоящее время использование методов зондовой электрометрии в неразрушающем контроле сдерживается сложностью интерпретации результатов измерений, что связано с многофакторностью измерительного сигнала, зависящего от большого количества параметров физико-химического состояния поверхности: отклонений химического состава, механических напряжений, дислокаций, кристаллографической ориентации поверхности и др. Целью исследования являлось применение методов зондовой электрометрии для неразрушающего контроля и анализа дефектов прецизионных металлических поверхностей, полученных различными видами обработки.

Методика экспериментальных исследований включала в себя построение визуализированного изображения пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) по поверхности образцов методом сканирующего зонда Кельвина, построение гистограммы распределения значений КРП и определение статистических характеристик распределения, таких как математическое ожидание значений КРП и полуширина гистограммы распределения (для каждой моды при многомодальном распределении).

Исследовано пространственное распределение КРП исходных подложек из алюминия А99 и сплава АМГ-2 после обработки поверхностей электрохимической полировкой и алмазным наноточением, а также после формирования на подготовленной поверхности слоя специфического наноструктурированного оксида алюминия толщиной 30 мкм. Более высоким качеством обладают поверхности, характеризующиеся меньшей полушириной гистограммы распределения. Наибольшей механической прочностью и в целом лучшими механическими свойствами при прочих равных условиях обладают поверхности с наиболее низкими значениями контактной разности потенциалов, что соответствует наибольшим значениями работы выхода электрона и поверхностной энергии. Наличие второй моды в гистограмме распределения значений контактной разности потенциалов указывает на наличие значимых по площади дефектных областей на соответствующей поверхности образца.

Экспериментально показано, что анализ визуализированных изображений пространственного распределения КРП с использованием данных критериев позволяет выявлять и характеризовать такие дефекты, как места концентрации остаточных механических напряжений, участки с пониженной микротвердостью поверхности, загрязнения, коррозионные дефекты. Тем самым обеспечивается возможность оперативного неразрушающего контроля и диагностики функциональных характеристик прецизионных поверхностей металлов, в частности, исходных подложек для изготовления чувствительных элементов устройств сенсорики.

Ключевые слова: поверхность, дефект, алюминий, зонд Кельвина, контактная разность потенциалов.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72

Абрес оля переписки:	Address for correspondence:
Тявловский А.К.	Tyavlovsky A.K.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by	e-mail: tyavlovsky@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
Тявловский А.К., Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Мухуров Н.И.,	Tyavlovsky A.K., Zharin A.L., Gusev O.K., Varabei R.I., Muhurov N.I.,
Шаронов Г.В., Пантелеев К.В.	Sharonov G.V., Pantsialeyeu K.U.
Анализ дефектов поверхности исходных подложек алюминия и его	[Analysis of surface defects of aluminum and its alloys with a scanning
сплавов методом сканирующего зонда Кельвина.	Kelvin probe].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 61–72.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 61–72 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72

Analysis of surface defects of aluminum and its alloys with a scanning Kelvin probe

Tyavlovsky A.K.¹, Zharin A.L.¹, Gusev O.K.¹, Varabei R.I.¹, Muhurov N.I.², Sharonov G.V.³, Pantsialeyeu K.U.¹

¹Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus ²State Scientific and Production Amalgamation «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus ³Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus, Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus

Received 12.01.2016 Accepted for publication 14.02.2017

Abstract

Currently, the use of probe electrometry in non-destructive testing is constrained by the complexity of measurement results interpretation. An output signal of electrometric probe depends on a number of physical and chemical parameters of surface including chemical composition variations, stresses, dislocations, crystallographic orientation of a surface, etc. The study aims to the use of probe electrometry methods for non-destructive testing and analysis of precision metal surfaces' defects after different treatment or processing.

Control of surface defects of aluminum and its alloys was performed with a scanning Kelvin probe technique. The results of scanning were plotted in a form of contact potential difference (CPD) distribution map. Additionally, a histogram of CPD values distribution and statistical characteristics including the expectation of CPD mean value and histogram half-width were calculated either for the whole distribution or for each individual mode in a case of multimodal distribution.

The spatial CPD distribution of A99 aluminum and AMG-2 alloy surfaces after electrochemical polishing and diamond finishing was studied. An additional study was held for AMG-2 surface after the formation of 30 microns thick specific nanostructured alumina oxide surface layer. Higher quality surfaces have characterized as more homogeneous distribution of the physical properties (at half-width distribution histogram). Surfaces with higher mechanical strength and overall better mechanical properties found to have lower CPD values that correspond to higher electron work function and surface energy. The presence of the second mode in the CPD distribution histogram indicates the significant proportion of defect areas on the sample surface.

Analysis of visualized CPD distribution maps using defined criteria allows detecting and characterizing such defects as residual stress areas, areas with reduced microhardness, surface contamination spots, corrosion defects. This provides the possibility of rapid nondestructive testing and diagnostic of precision metal surfaces, in particular the starting substrates for sensitive elements and sensory devices manufacture.

Keywords: surface, defect, aluminum, Kelvin probe, contact potential difference.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Тявловский А.К.	Tvavlovsky A.K.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by	e-mail: tyavlovsky@bntu.by
Для цитирования:	For citation:
Тявловский А.К., Жарин А.Л., Гусев О.К., Воробей Р.И., Мухуров Н.И.,	Tyavlovsky A.K., Zharin A.L., Gusev O.K., Varabei R.I., Muhurov N.I.,
Шаронов Г.В., Пантелеев К.В.	Sharonov G.V., Pantsialeyeu K.U.
Анализ дефектов поверхности исходных подложек алюминия и его	[Analysis of surface defects of aluminum and its alloys with a scanning
сплавов методом сканирующего зонда Кельвина	Kelvin probe].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 61–72.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 61–72 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-61-72

Введение

Развитие технологий обработки поверхности, связанное, в частности, с разработкой новых методов поверхностного упрочнения (ионно-лучевое азотирование и др.), формирования наноструктурированных покрытий и других способов придания поверхности заданных функциональных свойств, требует создания и внедрения новых методов неразрушающего контроля, отличающихся высокой чувствительностью и нетребовательностью к условиям окружающей среды. Данным требованиям хорошо соответствуют методы зондовой электрометрии, основанные на измерении контактной разности потенциалов (КРП) поверхности с помощью бесконтактного зонда Кельвина [1]. Толщина слоя материала, в пределах которого происходит формирование измерительного сигнала зонда Кельвина, определяется Дебаевской длиной экранирования, составляющей для металлов несколько атомных слоев. Это обеспечивает возможность контроля поверхностных слоев наноразмерной толщины независимо от параметров основного материала. В то же время наличие на поверхности тонкого диэлектрического слоя (в виде защитного покрытия или естественного окисла) не сказывается на результатах измерений вследствие большой, много больше толщины покрытия, Дебаевской длины экранирования для диэлектриков. Измерения методом Кельвина-Зисмана могут производиться как в вакуумной камере, так и при нормальных условиях, при этом в обоих случаях физический контакт зонда с поверхностью образца и какиелибо энергетические воздействия на поверхность отсутствуют, что гарантирует сохранность последней.

В настоящее время использование методов зондовой электрометрии в неразрушающем контроле сдерживается сложностью интерпретации результатов измерений. Измеряемой величиной для зонда Кельвина является КРП, определяемая разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) поверхностей образца и зонда и зависящая от целого ряда факторов физико-химического состояния поверхности: отклонений химического состава, механических напряжений, дислокаций, кристаллографической ориентации поверхности и др. При этом во многих случаях качество поверхности элементов и изделий, относящихся к прецизионным (чувствительных элементов сенсорных устройств, оптических поверхностей, изделий прецизионной механики и микромеханики) в общем виде можно свести к характеристикам чистоты и однородности распределения электрофизических свойств по поверхности. Исследование однородности распределения электрофизических свойств может быть осуществлено за счет использования сканирующего режима зонда Кельвина, при этом в качестве эталона для калибровки чувствительного элемента используется сама исследуемая поверхность образца, что устраняет проблему отсутствия априорной информации о значении РВЭ поверхности зонда.

Объектом настоящего исследования являлись прецизионные поверхности исходных подложек из алюминия А99 и сплава АМГ-2, применяемых для изготовления чувствительных элементов сенсорных устройств. Высокая чистота и чувствительность поверхности, предназначенной для последующего формирования наноструктурированного покрытия, исключает применение контактных методов контроля. В то же время для оптимизации технологических режимов обработки в соответствии с функциональными назначениями формируемых приборов и устройств большое значение имеет выявление и распознавание дефектов поверхности, создаваемых на каждом этапе технологической обработки.

Целью исследования являлось применение методов зондовой электрометрии для неразрушающего контроля и анализа дефектов прецизионных металлических поверхностей, полученных различными видами обработки. Задачи исследования включали обоснование критериев классификации дефектов, выполнение экспериментальных исследований пространственного распределения электрофизических свойств прецизионных металлических поверхностей на разных стадиях технологической обработки и сопоставительный анализ результатов визуализации распределения электрофизических свойств с учетом априорной информации о возможности присутствия дефектов определенного типа.

Методика исследований

Ранние теоретические модели влияния деформированного состояния металла на РВЭ поверхности рассматривали изменения данных параметров как следствие изменения длины и угла межатомных связей вследствие изменения объема и плотности атомных кластеров под нагрузкой [2]. Согласно этим моделям, РВЭ ф поверхности металла может рассматриваться как сумма двух слагаемых:

$$\varphi = -(\mu + e\psi_S), \tag{1}$$

где μ – электрохимический потенциал; e – элементарный заряд (заряд электрона); ψ_s – поверхностный потенциал.

Электрохимический потенциал электронов в напряженной зоне понижается, вследствие чего электроны из окрестности перемещаются в данную область под действием градиента потенциалов. Таким образом, для одновалентного металла знак потенциала (изменения РВЭ, регистрируемого по изменению КРП) напряженной зоны должен оказаться отрицательным, а величина изменения КРП может составлять до 0,8 В при относительной деформации 10 % [2]. Данная величина для реальных металлов находится в области пластических деформаций. Для области упругих деформаций кристаллической структуры металла подобные расчеты были выполнены на основе самосогласующегося метода Кона-Шама [3, 4]. Согласно приводимым в литературе данным теоретического моделирования, изменение потенциала в области упругих деформаций для чистого алюминия в кристаллографической плоскости (111) достигает минус 0,1 В при растяжении и 0,1 В при сжатии [3]. Изменения электрического потенциала поверхности при упругих деформациях следует отнести на счет изменения второго слагаемого в базовом выражении (1), вызванного изменением длины межатомных связей, тогда как изменение положения уровня Ферми, как показали результаты моделирования, при деформациях незначительно.

В современной научной литературе приводятся также результаты экспериментальных измерений РВЭ поверхности металлов и ее изменений, вызванных механическими напряжениями [4-6]. В частности, показано, что знакопеременное нагружение образцов из алюминия и титана приводит к понижению значений РВЭ в области концентрации напряжений. Минимум значений РВЭ достигается непосредственно перед разрушением образца. Характерно, что уменьшение значений РВЭ наблюдалось также на стороне образца, противоположной той, на которой формировалась первичная трещина. Можно высказать предположение, что наблюдаемые изменения РВЭ связаны как с увеличением количества дислокаций, так и с формированием новых поверхностей в процессе разрушения образца, связанного с развитием трещины. В случае упругих и пластических деформаций доступные экспериментальные данные подтверждают небольшое изменение величины РВЭ с поверхности алюминия при его нагружении, составляющее приблизительно 0,08 эВ при относительном удлинении 6 % (область пластической деформации), что в рамках существующих моделей может быть объяснено формированием дефектов и вакансий внутри зерен металла [5]. Различными исследователями независимо показано, что упругие деформации растяжения приводят к уменьшению регистрируемых значений РВЭ, тогда как упругие деформации сжатия напротив, к ее росту [6]. С другой стороны, в области пластической деформации имеет место уменьшение значений РВЭ как при растяжении, так и при сжатии, причем величина уменьшения находится в пределах 0,18-0,2 эВ, что соответствует увеличению регистрируемых значений КРП на 180-200 мВ [6].

Изменения КРП могут быть также связаны с переносом вещества на поверхность металла. Адсорбция атомов или молекул на поверхности сопровождается переносом заряда между адсорбатом и субстратом, что приводит к модификации поверхностного двойного слоя. Следствием этого является изменение поверхностного потенциала на некоторую величину $\Delta \psi_s$ и соответствующее изменение внешней РВЭ. В первом приближении модель поверхностного двойного слоя можно представить моделью плоского конденсатора. В этом случае изменение поверхностного потенциала $\Delta \psi_s$ может быть выражено через характеристики поверхностного двойного слоя как [2]:

$$\Delta \Psi_{S} = \frac{n_{ad}}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{r}} \cdot p \cdot n, \qquad (2)$$

где n_{ad} – поверхностная плотность адсорбированных молекул; p – дипольный момент; n – единичный нормальный вектор, перпендикулярный поверхности; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε_r – удельная диэлектрическая проницаемость вакуума, равная 1.

Дипольный момент определяется как:

$$\vec{p} = \delta q \cdot \vec{r},\tag{3}$$

где δq – частичный заряд, соответствующий количественной величине переноса заряда между адсорбатом и субстратом; \vec{r} – вектор, определяющий ориентацию и длину связи между адсорбатом и атомом субстрата.

Из (1) следует, что изменение КРП численно равно изменению РВЭ, взятому с обратным зна-ком:

$$\Delta \varphi = -\Delta \psi_s. \tag{4}$$

Величина и знак $\Delta \varphi$ зависят от значения электроотрицательности χ адсорбируемых молекул и от ориентации поверхностных диполей. Если электроотрицательность адсорбата χ_{ad} выше, чем электроотрицательность субстрата χ_{sub} , последний будет притягивать электроны, что приведет к понижению поверхностного потенциала и, соответственно, увеличению РВЭ ($\Delta \varphi > 0$). При обратном соотношении ($\chi_{ad} < \chi_{sub}$) поверхностный потенциал будет возрастать, что приведет к уменьшению РВЭ ($\Delta \varphi < 0$). Соотношение значений электроотрицательности χ_{ad} и χ_{sub} определяет величину участвующего в обмене частичного заряда δq .

Таким образом, изменение физико-химических и механических параметров поверхности металлов отражается в соответствующем изменении РВЭ. Регистрация данных изменений в настоящем исследовании осуществлялась с помощью измерительного преобразователя (зонда Кельвина), реализующего сканирующий режим измерения. В основу работы преобразователя положен метод измерения КРП, известный как метод Кельвина–Зисмана.

Для измерительного преобразователя, реализующего метод Кельвина–Зисмана, КРП определяется разностью значений РВЭ контролируемого участка поверхности ϕ_1 и зонда ϕ_2 :

$$U_{CPD} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e},\tag{5}$$

где е – элементарный заряд (заряд электрона).

С учетом того, что РВЭ зонда ϕ_2 при измерениях является величиной постоянной, пространственное распределение КРП U_{CPD} по поверхности образца соответствует распределению значений РВЭ поверхности образца ϕ_1 , отражающему неоднородность физико-химических свойств поверхности и распределение ее дефектов. При измерениях по методу Кельвина–Зисмана полностью отсутствуют воздействия на объект исследования.

Методика экспериментальных исследований включала в себя построение визуализированного изображения пространственного распределения КРП по поверхности образцов на основании результатов сканирования, построение гистограммы распределения значений КРП и определение статистических характеристик распределения, таких как математическое ожидание значений КРП и полуширина гистограммы распределения (для каждой моды при многомодальном распределении).

Результаты и обсуждение

На рисунках 1а и в приведены результаты визуализации пространственного распределения КРП верхней и нижней поверхности исходной пластины из алюминия А99, не подвергавшейся какой-либо обработке. На визуализированном изображении хорошо прослеживаются многочисленные дефектные области, ассоциируемые как со следами загрязнений поверхности (участки с повышенными значениями КРП), так и с неоднородностью механических свойств поверхности, в частности шероховатости. Качество верхней поверхности исследованного образца значительно ниже, чем качество нижней, что наглядно видно в том числе и по разной ширине гистограмм распределения значений КРП, приведенных на рисунках 1c и d соответственно.

Электрохимическая полировка поверхности обеспечила повышение качества обеих (верхней и нижней) поверхностей исходной пластины А99 по параметрам однородности распределения электрофизических свойств поверхности, что наглядно видно из рисунка 2. Вместе с тем карты распределения КРП показывают определенную неравномерность процесса электрохимической полировки, о чем свидетельствует плавное изменение значений КРП от верхнего к нижнему краю пластины на рисунках 2a и b. Помимо этого, на картах распределения КРП наблюдаются и отдельные точечные дефекты электрохимической обработки.

На рисунке 3 приведены карты распределения КРП верхней и нижней поверхности исходной пластины из сплава АМГ-2. Можно видеть, что обе поверхности исходного образца также характеризуются многочисленными дефектами, однако характер их распределения иной, чем у образца из чистого алюминия А99. Обращают на себя внимание резко повышенные (на 100 мВ и более по сравнению с математическим ожиданием для центральных областей пластины) значения КРП кромки образца, что, очевидно, может быть отнесено на счет остаточных механических напряжений от технологических операций, связанных с первичным формообразованием образца.



Рисунок 1 – Карты распределения контактной разности потенциалов (*a* – верхней поверхности; *b* – нижней поверхности) и гистограммы распределения значений контактной разности потенциалов (*c* – верхней поверхности; *d* – нижней поверхности) исходной пластины А99 без обработки

Figure 1 – Contact potential difference distribution maps (a – upper surface; b – lower surface) and contact potential difference distribution histograms (c – upper surface; d – lower surface) of A99 starting plate without treatment





Рисунок 2 – Карты распределения контактной разности потенциалов (*a* – верхней поверхности; *b* – нижней поверхности) и гистограммы распределения значений КРП (*c* – верхней поверхности; *d* – нижней поверхности) исходной пластины А99 после электрохимической полировки поверхности

Figure 2 – Contact potential difference distribution maps (a – upper surface; b – lower surface) and contact potential difference distribution histograms (c – upper surface; d – lower surface) of A99 starting plate after electrochemical polishing



Рисунок 3 – Карты распределения контактной разности потенциалов (*a* – верхней поверхности; *b* – нижней поверхности) и гистограммы распределения значений КРП (*c* – верхней поверхности; *d* – нижней поверхности) исходной пластины АМГ-2 без обработки

Figure 3 – Contact potential difference distribution maps (a – upper surface; b – lower surface) and contact potential difference distribution histograms (c – upper surface; d – lower surface) of AMG-2 starting plate without treatment

Чистовая обработка алмазным наноточением, включающая полное удаление нарушенного предыдущими операциями поверхностного слоя материала, приводит к резкому повышению качества поверхности по параметру однородности распределения ее электрофизических свойств. Карты распределения КРП для образца, подвергнутого такой обработке, показаны на рисунке 4. Видно, что поверхность в целом не содержит значительных дефектов, в том числе отсутствуют локальные точечные дефекты, характерные для электрохимической полировки. Вместе с тем краевые области пластины имеют повышенные (на 25–30 мВ для верхней и на 15–25 мВ для нижней поверхности) значения КРП. С наибольшей долей вероятности это может быть объяснено неполным удалением наклепанного слоя, глубина которого превышала глубину обработки алмазным наноточением, либо небольшим вторичным наклепом, связанным с особенностями закрепления образца при обработке. Независимо от причин формирования степень дефектности краев пластины оценивается как значительно более низкая, чем для необработанного образца, исходя из сопоставления величин отклонения КРП этих областей поверхности.



Рисунок 4 – Карты распределения контактной разности потенциалов (*a* – верхней поверхности; *b* – нижней поверхности) и гистограммы распределения значений КРП (*c* – верхней поверхности; *d* – нижней поверхности) пластины АМГ-2 с обработанными алмазным наноточением поверхностями

Figure 4 – Contact potential difference distribution maps (a – upper surface; b – lower surface) and contact potential difference distribution histograms (c – upper surface; d – lower surface) of AMG-2 starting plate after diamond finishing

После обработки алмазным наноточением на обеих поверхностях пластины АМГ-2 было сформировано покрытие из специфического наноструктурированного оксида алюминия толщиной до 30 мкм, при этом реальная толщина покрытия верхней и нижней поверхностей вследствие отклонения параметров технологического процесса оказалась различной. Результаты визуализации пространственного распределения КРП верхней и нижней поверхности пластины АМГ-2 после формирования наноструктурированного покрытия приведены на рисунках 5*a* и *b* соответственно.

Нанесение покрытия привело к значительному (на 220–320 мВ) понижению значений КРП поверхности пластины АМГ-2, что соответствует росту эффективных значений РВЭ на аналогичную величину (220–320 мэВ). КРП верхней и нижней поверхности отличаются на 125 мВ, при том что разность математического ожидания КРП верхней и нижней поверхности после алмазного наноточения (до нанесения покрытия) составляла только 16 мВ (рисунок 4). Очевидно, такая разность связана с различной толщиной покрытия, но может также указывать на различие механических свойств (конкретно, микротвердости) покрытия верхней и нижней стороны пластины, следующего из их разнотолщинности. КРП покрытия нижней поверхности мало отличается от КРП стального держателя (рисунок 5b), что затрудняет выделение контуров образца на визуализированном изображении. В то же время это позволяет предполагать близость механических свойств данной наноструктурированной поверхности к свойствам легированной стали, из которой изготовлен держатель.



Рисунок 5 – Карты распределения контактной разности потенциалов (*a* – верхней поверхности; *b* – нижней поверхности) и гистограммы распределения значений КРП (*c* – верхней поверхности; *d* – нижней поверхности) пластины АМГ-2 после формирования наноструктурированного покрытия

Figure 5 – Contact potential difference distribution maps (a – upper surface; b – lower surface) and contact potential difference distribution histograms (c – upper surface; d – lower surface) of AMG-2 starting plate after nanostructured layer formation

Резкое отклонение значений РВЭ вблизи среза пластины АМГ-2, наблюдаемое на визуализированном изображении (рисунок 5), вызвано тем, что небольшой участок у края пластины вследствие особенностей технологии остался свободным от покрытия (рисунок 6). Обращают на себя

внимание наблюдаемые на визуализированном изображении нижней поверхности (рисунок 5а) слабовыраженные параллельные наклонные линии, отражающие периодические отклонения значений КРП на ±1 мВ от математического ожидания для данной поверхности. Данные линии соответствуют направлению линий шероховатости, визуально наблюдаемым на поверхности образца при увеличении. Поскольку расстояние зонд-образец, составлявшее в процессе сканирования 0,3 мм, на несколько порядков превышало высоту профиля шероховатости, наблюдаемые отклонения КРП могут быть отнесены только на счет перераспределения механических напряжений между вершинами и впадинами профиля, что подтверждает исключительно высокую чувствительность метода Кельвина-Зисмана к такого рода дефектам. Следует отметить, что наблюдаемые отклонения (±1 мВ) составляют величину меньше нормируемой случайной погрешности измерения используемого зонда Кельвина (±2 мВ). Выявление столь малых отклонений оказалось возможным за счет реализации сканирующего режима измерений, при котором визуализированное изображение формируется как результат большого количества (в данном случае около 105 для каждого изображения) единичных измерений, что приводит к соответствующему уменьшению погрешности среднего значения результатов многократных измерений. В остальном, в отличие от исходной поверхности, электрофизические свойства покрытия распределены достаточно равномерно, без повышения КРП у краев; вблизи центра нижней поверхности наблюдается точечный дефект малых (порядка диаметра зонда или менее) размеров.





Figure 6 – Appearance (*a*) and visualized contact potential difference distribution map (*b*) of a plate with nanostructured surface layer

Сформулированные на основании приведенного теоретического анализа и сопоставления экспериментально полученных результатов исследования пространственного распределения электрофизических свойств прецизионных поверхностей с данными других методов исследования (измерений поверхностной микротвердости, износостойкости, металлографического исследования и др.) [7–8] критерии анализа получаемых визуализированных изображений сводятся к следующему:

1. Более высоким качеством обладают поверхности, характеризующиеся большей однородностью распределения электрофизических свойств (меньшей полушириной гистограммы распределения). Из приведенных примеров наибольшим качеством характеризуется верхняя поверхность пластины АМГ-2 после алмазного наноточения (полуширина гистограммы распределения 5 мВ), а наименьшим – верхняя поверхность исходной пластины А99 (полуширина гистограммы распределения 41 мВ).

2. Наибольшей механической прочностью и в целом лучшими механическими свойствами при прочих равных условиях обладают поверхности с наиболее низкими значениями контактной разности потенциалов, что соответствует наибольшим значениями работы выхода электрона и поверхностной энергии. В данном случае наибольшую микротвердость поверхности демонстрирует верхняя поверхность пластины АМГ-2 после формирования наноструктурированного покрытия, характеризующаяся средним значением КРП нижней поверхности минус 128 мВ.

3. Наличие второй моды в гистограмме распределения значений контактной разности потенциалов указывает на наличие значимых по площади дефектных областей на соответствующей поверхности образца.

Классификация выявленных на визуализированной карте дефектов осуществлялась с учетом следующих общих принципов:

– участки с пониженными значениями КРП, прослеживаемые на обеих (верхней и нижней) поверхностях образца, классифицируются как места концентрации остаточных механических напряжений и/или пластических деформаций в материале образца. Участки с повышенными значениями КРП, прослеживаемые на обеих (верхней и нижней) поверхностях образца, классифицируются как прочие внутренние дефекты (микротрещины, инородные включения и др.). При классификации следует учитывать, что области концентрации механических напряжений, как правило, характеризуются вытянутой, часто линейной, формой [8, 9];

 участки с пониженными значениями КРП, прослеживаемые только на одной поверхности металлического образца, классифицируются как локальные дефекты поверхности, связанные с понижением механических свойств (микротвердости, поверхностной прочности) [10];

 участки с повышенными значениями КРП, прослеживаемые только на одной поверхности металлического образца, классифицируются как места загрязнения поверхности адсорбированными инородными атомами или молекулами;

– участки металлических поверхностей с наибольшими градиентами КРП классифицируются как коррозионные дефекты либо области с пониженной коррозионной стойкостью. К настоящему времени подтверждена возможность выявления по локальным градиентам КРП мест будущей коррозии на самых ранних стадиях ее развития [10].

Заключение

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать базовые критерии классификации визуализируемых методами зондовой электрометрии дефектов, основанные на анализе особенностей пространственного распределения РВЭ или КРП поверхности, градиента и знака их отклонений от среднего для данной поверхности значения.

Экспериментально показано, что анализ визуализированных изображений пространственного распределения КРП с использованием данных критериев позволяет выявлять и характеризовать такие дефекты, как места концентрации остаточных механических напряжений, участки с пониженной микротвердостью поверхности, загрязнения, коррозионные дефекты. Тем самым обеспечивается возможность оперативного неразрушающего контроля и диагностики функциональных характеристик прецизионных поверхностей металлов, в частности, исходных подложек для изготовления чувствительных элементов устройств сенсорики.

Анализ полученных методами зондовой электрометрии визуализированных изображений пространственного распределения КРП исходных подложек на различных стадиях обработки позволил установить, что операции алмазного наноточения, связанные с механическим удалением нарушенного поверхностного слоя, обеспечивают более высокое качество обработанной поверхности, чем операции электрохимической полировки.

Список использованных источников

1. *Вудраф, Д.* Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. – М. : Мир, 1989. – 564 с.

2. *Nazarov, A.* Application of EIS and SKP methods for the study of the zinc/polymer interface / A. Nazarov, T. Prosek, D. Thierry // Electrochimica Acta. – 2008. – Vol. 53, no. 25. – P. 7531–7538.

3. *Kiejna, A.* Simple theory of elastically deformed metals: Surface energy, stress, and work function / A. Kiejna, V.V. Pogosov // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 62. – P. 10445–10450.

4. *Pogosov, V.V.* Effect of Deformation on Surface Characteristics of Finite Metallic Crystals / V.V. Pogosov, O.M. Shtepa // Ukr. J. Phys. – 2002. – Vol. 47, no. 11. – P. 1065–1070.

5. *Levitin, V.V.* Inflence of Cyclic Stresses upon the Electronic Work Function for the Metal Surface / V.V. Levitin [et al.] // Solid State Communications. – 1994. – Vol. 92, no. 12. – P. 973–976.

6. Лоскутов, С.В. Формирование энергетического рельефа металлических поверхностей в процессах трения и изнашивания / С.В. Лоскутов, В.В. Левитин, В.Н. Гордиенко // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 2. – С. 176–180.

7. Шаронов, Г.В. Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона / Г.В. Шаронов, А.Л. Жарин, Н.И. Мухуров, К.В. Пантелеев // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 2 (10). – С. 196–203.

8. *Zhong, K.* Effects of strain on effective work function for Ni/HfO2 interfaces / K. Zhong, G. Xu, J.-M. Zhang, Z. Huang // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 116. – P. 063707.

9. *Li*, *W*. In situ measurements of simultaneous electronic behavior of Cu and Al induced by mechanical deformation / W. Li, D. Y. Li //J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 99. – P. 073502.

10. Белый, А.В. Работа выхода электрона и физикомеханические свойства хромсодержащих ионнолегированных сталей / А.В. Белый, А.Л. Жарин, А.Н. Карпович, А.К. Тявловский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 1. – С. 21–27.

References

1. Woodruff D., Delchar T. *Sovremennye metody issledovaniya poverkhnosti* [Modern techniques of surface science]. Moscow, Mir Publ., 1989, 564 p. (in Russian).

2. Nazarov A., Prosek T., Thierry D. Application of EIS and SKP methods for the study of the zinc/polymer interface. *Electrochimica Acta*, 2008, vol. 53, no. 25, pp. 7531–7538. **doi**: 10.1016/j.electacta.2007.11.053.

3. Kiejna A., Pogosov V.V. Simple theory of elas tically deformed metals: Surface energy, stress, and work function. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, pp. 10445–10450. **doi**: 10.1103/PhysRevB.62.10445 4. Pogosov V.V., Shtepa O.M. Effect of Deformation on Surface Characteristics of Finite Metallic Crystals. *Ukr. J. Phys.*, 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1065–1070.

5. Levitin V.V., Loskutov S.V., Pravda M.I., Serpetzky B.A. Inflence of Cyclic Stresses upon the Elec tronic Work Function for the Metal Surface. *Solid State Communications*, 1994, vol. 92, no. 12, pp. 973–976. **doi**: 10.1016/0038-1098(94)90023-X

6. Loskutov S.V., Levitin V.V., Gordienko V.N. [Formation of metal surfaces energetic relief in the pro cesses of friction and wear]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2002, vol. 23, no. 2. pp. 176–180 (in Russian).

7. Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeyeu K.U. [Control of metal surfaces machined in ac cordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function]. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], 2015, no. 6(2), pp. 196–203 (in Russian).

8. Zhong K., Xu G., Zhang J.-M., Huang Z. Effects of strain on effective work function for Ni/HfO2 interfaces. *J. Appl. Phys.*, 2014, vol. 116, p. 063707. **doi**: 10.1063/1.4892799

9. Li W., Li D.Y. In situ measurements of simultane ous electronic behavior of Cu and Al induced by mechani cal deformation. *J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 99, p. 073502. **doi**: 10.1063/1.2181300

10. Belyi A.V., Zharin A.L., Karpovich A.N., Tyavlovsky A.K. [Electron work function and physical and mechanical properties of the chromium ion-doped steels]. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physico-technical series], 2016, no. 1, pp. 21–27 (in Russian).
УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

Алгоритм определения компонентов сеанса лучевой терапии для различных методов облучения онкологических пациентов на этапе их предлучевой подготовки

Титович Е.В.¹, Потепалов П.О.¹, Петкевич М.Н.¹, Киселев М.Г.²

¹РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь ²Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 09.01.2017 Принята к печати 15.02.2017

Одним из основных факторов, влияющих на эффективность облучения онкологических больных являются временные параметры (время, которое больной проводит в процедурном помещении) сеанса облучения пациента, от которых напрямую зависит точность его позиционирования, а значит и правильность доставки предписанного дозового распределения. Цель работы – определение оказывающих влияние на сеанс облучения компонентов временных характеристик и разработка алгоритма, позволяющего установить продолжительность лечения с использованием различных методик лучевой терапии и локализаций опухоли.

Для установления компонентов сеанса лучевой терапии, оказывающих доминирующее влияние на его временные характеристики, авторами проведен ретроспективный анализ каждой фракции всей выборки планов облучения онкологических пациентов с локализациями опухолевых очагов, которые наиболее часто подвергались лучевому лечению с применением линейных ускорителей в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова (более 5200 фракций). На основании результатов анализа разработаны алгоритмы для оценки временных параметров сеанса лучевой терапии онкологического пациента на этапе его предлучевой подготовки, с учетом индивидуальных особенностей лучевого лечения для каждой из наиболее применимый в клинической практике отделения лучевой терапии РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова методик облучения.

С использованием предложенных алгоритмов выявлены компоненты сеансов лучевой терапии, оказывающие доминирующее влияние на его временные характеристики при облучении по методикам трехмерной конформной лучевой терапии (3Д КЛТ), лучевой терапии с модуляцией интенсивности (ЛТМИ) и секторной лучевой терапии с объемной модуляцией интенсивности (СЛТМИ) (количество радиационных полей, установка дозомодулирующих устройств, поворот терапевтического стола, длительность облучения одного радиационного поля, верификация положения пациента, инициализация ускорителя с параметрами облучения) и характеристики линейного ускорителя и плана облучения, от которых зависит длительность этих компонентов. Установлено среднее время облучения по каждой из методик лучевой терапии и рассматриваемых локализаций опухолевых очагов (от 4 до 8 мин для 3Д КЛТ, от 4 до 8 мин для ЛТМИ, от 3 до 4 мин для СЛТМИ).

Ключевые слова: сеанс облучения, линейный ускоритель, лучевая терапия, временные характеристики. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-1-73-80

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Потепалов П.О.	Patsiapalau P.A.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,	N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь	Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus
e-mail: pashokpashok@tut.by	e-mail: pashokpashok@tut.by
Для цитирования:	For citation:
Титович Е.В., Потепалов П.О., Петкевич М.Н., Киселев М.Г.	Titovich E.V., Patsiapalau P.A., Piatkevich M.N., Kiselev M.G.
Алгоритм определения компонентов сеанса лучевой терапии для раз-	[The algorithm for determining timing of radiotherapy session
личных методов облучения онкологических пациентов на этапе их	components for different methods of oncology patients irradiation at the
предлучевой подготовки.	stage of radiotherapy planning].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. – C. 73–80.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 73–80 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-73-80	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-73-80

The algorithm for determining timing of radiotherapy session components for different methods of oncology patients irradiation at the stage of radiotherapy planning

Titovich E.V.¹, Patsiapalau P.A.¹, Piatkevich M.N.¹, Kiselev M.G.²

¹N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus ²Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013,, Belarus

Received 09.01.2017 Accepted for publication 15.02.2017

Abstract

One of the main factors affecting the efficiency of oncology patients radiation therapy are time parameters (the amount of time that a patient spends in the therapy room) of the patient exposure session, because the patient treatment position depends on them, and thus the accuracy of delivery of the prescribed dose distribution too. The objective of this work was to define components that influence on the treatment session and to develop an algorithm that allows to determine the duration of the patient treatment sessions with the use of different methods of radiotherapy and tumor localization.

In order to determine radiation therapy session components, that cause the dominant influence on the session timing, the authors carried out a retrospective analysis of each fraction of the total sample of cancer patients treatment plans with most often irradiated with the use of linear accelerators in the NCCB localizations of tumors (more than 5200 fractions).

The appropriate algorithms were designed to assess the results of the analysis of time parameters of radiation therapy oncology patient session during its pre-radiation preparation. It allowed to take into account the individual characteristics of radiation treatment for each irradiation techniques that are the most useful in clinical practice of NCCB radiotherapy department. The components of radiation therapy sessions that caused dominant influence on session characteristics using methods of three-dimensional conformal radiation therapy (3D CRT), intensity modulated radiation therapy (IMRT) and volumetric modulated arc therapy (VMAT) were identified.

The characteristics of the linear accelerator and the irradiation plan that influenced the duration of these components (number of radiation fields, dose affecting devices placement, treatment table rotation, treatment field irradiation duration, verification of patient positioning, treatment parameters initialization) were defined. Average exposure time is established for each of the examined methods of radiotherapy and localizations of tumor (from 4 to 8 min for 3D CRT, from 4 to 8 min for IMRT for 3 to 4 min for VMAT).

Keywords: treatment session, linear accelerator, radiation therapy, timing.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-73-80

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Потепалов П.О.	Patsiapalau P.A.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,	N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
агрогородок Лесной 223040, Минский район, Беларусь	Lesnoy 223040, Minsk District, Belarus
e-mail: pashokpashok@tut.by	e-mail: pashokpashok@tut.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Титович Е.В., Потепалов П.О., Петкевич М.Н., Киселев М.Г.	Titovich E.V., Patsiapalau P.A., Piatkevich M.N., Kiselev M.G.
Алгоритм определения компонентов сеанса лучевой терапии для	[The algorithm for determining timing of radiotherapy session
различных методов облучения онкологических пациентов на этапе их	components for different methods of oncology patients irradiation at the
предлучевой подготовки.	stage of radiotherapy planning].
Приборы и методы измерений.	<i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements].
2017. – Т. 8, № 1. – С. 73–80.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 73–80(in Russian).
POIL 10. 21122/2220. 0506. 2017. 8, 1, 73, 80.	DOL 1 .021122/2220.0506 2017. 8 1, 73–80.

Введение

Лучевая терапия (ЛТ) является одним из ведущих методов лечения больных с онкологическими заболеваниями и эффективна более чем у 50 % пациентов [1]. Главным требованием к радиационной защите пациентов в лучевой терапии является максимально возможное снижение поглощенной дозы на нормальные ткани и органы, окружающие опухоли, при высоких значениях дозы в самой опухоль [2]. Для обеспечения радиационной безопасности онкологических пациентов, получающих лучевую терапию, требуется обеспечить постоянство их положения на лечебном столе с использованием фиксирующих приспособлений различной конструкции на протяжении всего сеанса облучения [3]. Международная комиссия по радиологическим единицам в 1976 г. рекомендовала, чтобы неопределенность подведения поглощенной дозы к мишени на любых терапевтических аппаратах не превышала 5 % [4]. Одним из основных факторов, от которых зависит эффективность облучения, являются временные параметры (время, которое пациент проводит в процедурном помещении) сеанса облучения пациента, от которых напрямую зависит точность позиционирования пациента, а значит и точность доставки предписанного дозового распределения [5]. В настоящее время не представляется возможным полностью исключить смещение опухоли, здоровых органов и тканей и самого тела пациента, возникающих в процессе его лучевого лечения, что может привести к лучевым реакциям и осложнениям. Известные протоколы дозиметрического планирования условий лучевого лечения не учитывают временные параметры сеанса облучения при выборе методики лучевой терапии [6, 7]. Известны клинические случаи, когда опухоль в процессе длительной процедуры лучевого лечения изменила свое положение более чем на 1 (см. [8, 9]). Такие отклонения в положении облучаемых тканей и структур могут привести к возникновению лучевых осложнений у пациентов, что обуславливает необходимость учета индивидуальных временных параметров сеанса лучевой терапии онкологического пациента на этапе его предлучевой подготовки. Разработка алгоритма для оценки временных параметров сеанса лучевой терапии онкологического пациента на этапе его предлучевой подготовки позволит учесть индивидуальные особенности лучевого лечения онкологического пациента и выполнить обоснованный выбор методики лучевой терапии (3Д КЛТ – трехмерная конформная лучевая терапия, ЛТМИ – лучевая терапия с модуляцией интенсивности либо СЛТМИ – секторная лучевая терапия с объемной модуляцией интенсивности) в каждом конкретном клиническом случае с учетом локализации злокачественного новообразования и предполагаемой длительности сеанса облучения.

Цель работы – определение оказывающих влияние на сеанс облучения компонентов временных характеристик и разработка алгоритма, позволяющего установить продолжительность лечения с использованием различных методик лучевой терапии и локализаций опухоли.

Основная часть

Сеанс лучевой терапии онкологического пациента в общем случае состоит из следующих этапов:

 – загрузка условий лучевого лечения больного (план облучения) в персональный компьютер (консоль ЛУ) с установленным на нем специализированым программным обеспечением 4*DITC*;

 проверка плана облучения больного на отсутствие ошибок в передаче данных;

 – укладка пациента и центрация в предписанном для проведения облучения положении;

 при необходимости устанавливаются дополнительные фиксирующие и дозомодулирующие устройства (физические клиновидные фильтры, теневые защитные блоки, компенсаторы) для индивидуализации условий лучевого лечения;

 – инициализация ускорителя с параметрами облучения, актуальными для первого лечебного поля;

 установка необходимых механических параметров ускорителя под визуальным контролем из процедурного помещения;

 при необходимости верификация положения больного на терапевтическом столе путем сравнения рентгеновских изображений, полученных непосредсвенно перед началом облучения с опорными изображениями, полученными при проведении симуляции условий лучевой терапии пациента;

 – оператор консоли ЛУ инициирует включение ионизирующего излучения и, таким образом, начинает процедуру лучевого лечения;

 по окончании облучения первого радиационного поля осуществляется инициализация ускорителя с параметрами облучения, актуальными для следующего лечебного поля.

Такие величины, как значения угла поворота штатива и коллиматора ускорителя, размеры радиационного поля, положение лепестков мультилепесткового коллиматора, могут быть изменены оператором консоли удаленно с использованием специализированного программного обеспечения. В случаях, когда этого не достаточно для точной установки всех предписанных условий лучевого лечения, медицинская сестра заходит в процедурный зал и устанавливает дозомодулирующие устройства, а также остальные необходимые параметры ЛУ с использованием пульта ручного управления. Процесс инициализации ЛУ и установки его параметров, требуемых для соблюдения условий облучения повторяется для каждого последующего радиационного поля вплоть до последнего. После облучения последнего предписанного радиационного поля оператор консоли ЛУ документирует результаты проведенного сеанса лучевой терапии как в онкологической информационной системе, так и в амбулаторной карте больного. Типовой план размещения медицинского линейного ускорителя на примере ЛУ *TrueBeam* компании *Varian*, представлен на рисунке 1 [10].



Рисунок 1 – Типовое размещение медицинского линейного ускорителя, его систем и консоли управления [10]: 1 – консоль линейного ускорителя; 2 – камеры видеонаблюдения; 3 – монитор в процедурной; 4 – терапевтический стол; 5 – лазер для позиционирования пациентов; 6 – линейный ускоритель; 7 – шкаф модулятора

Figure 1 – Typical placement of medical linear accelerator, its systems and treatment console [10]: 1 – linear accelerator console; 2 - CCTV cameras; 3 - treatment room monitor; 4 - treatment table; 5 - positioning laser; 6 - linear accelerator; 7 - modulator

Результаты исследований

Для установления компонентов сеанса лучевой терапии, оказывающих доминирующее влияние на его временные характеристики, авторами проведен ретроспективный анализ каждой фракции всей выборки планов облучения онкологических пациентов с локализациями опухолевых очагов, которые наиболее часто подвергались лучевому лечению с применением ЛУ в РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова (более 5200 фракций).

На основании результатов анализа авторами разработаны алгоритмы для оценки временных

параметров сеанса лучевой терапии онкологического пациента на этапе его предлучевой подготовки с учетом индивидуальных особенностей лучевого лечения для каждой из наиболее применимый в клинической практике отделения лучевой терапии РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова методик облучения. Алгоритмы осуществления типового сеанса лучевой терапии по методикам 3Д КЛТ, ЛТМИ и СЛТМИ представлены на рисунках 2 и 3.



Рисунок 2 – Алгоритм осуществления сеанса облучения пациента по методике трехмерной конформной лучевой терапии (3Д КЛТ)

Figure 2 – The algorithm of a patient irradiation session using the 3D conformal radiation therapy (3D CRT) technique



Рисунок 3 – Алгоритм осуществления сеанса облучения пациента по методикам лучевой терапии с модуляцией интенсивности (ЛТМИ) и секторной лучевой терапии с объемной модуляцией интенсивности (СЛТМИ)

Figure 3 – The algorithm of a patient irradiation session using the intensity-modulated radiotherapy (IMRT) and volumetric arc therapy VMAT techniques

На основании проведенного ретроспективного анализа планов облучения онкологических больных и с использованием разработанных алгоритмов осуществления типовых сеансов облучения онкологических пациентов по наиболее распространенным в клинической практике РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова методикам лучевой терапии авторами выявлены компоненты сеанса лучевой терапии, оказывающие доминирующее влияние на его временные характеристики и характеристики линейного ускорителя и плана облучения от которых зависит длительность этих компонентов. Результаты исследований представлены в таблице.

Таблица / Table

Компоненты типового сеанса лучевой терапии The components of standard radiotherapy session

Компонент ceaнca облучения Treatment session component	От чего зависит длительность Duration depends from	Для каких методик лучевой терапии оказывает влияние Influences treatment techniques
Количество радиационных полей Number of treatment fields	От локализации и методики облучения Tumor localization and treatment technique	3Д КЛТ, ЛТМИ, СЛТМИ (3D CRT, IMRT, VMAT)
Установка дозомодулирующих устройств Dose affecting devices placement	От локализации и методики облучения Tumor localization and treatment technique	3Д КЛТ (3D CRT)
Поворот терапевтического стола Treatment table rotation	От локализации Tumor localization	3Д КЛТ, ЛТМИ, СЛТМИ (3D CRT, IMRT, VMAT)
Длительность облучения одного ради- ационного поля Treatment field irradiation duration	Количество мониторных единиц, мощ- ность дозы Monitor units quantity and dose rate	3Д КЛТ, ЛТМИ, СЛТМИ (3D CRT, IMRT, VMAT)
Верификация положения пациента Verification of the patient position	От локализации и методики облучения Tumor localization and treatment technique	3Д КЛТ, ЛТМИ, СЛТМИ (3D CRT, IMRT, VMAT)
Инициализация ускорителя с параме- трами облучения Treatment parameters initialization	Количество радиационных полей Treatment fields quantity	3Д КЛТ, ЛТМИ, СЛТМИ (3D CRT, IMRT, VMAT)

Установлено что при осуществлении лучевого лечения по методикам ЗД КЛТ и ЛТМИ, наиболее часто применяются планы с 5-9 полями облучения, а по методике СЛТМИ - с 2 радиационными полями, что обуславливает значительные различия во времени проведения сеанса облучения с их использованием. Дозомодулирующие устройства, используемые для получения дозового распределения комплексной формы (физические клиновидные фильтры и др.), для установки/снятия которых медицинской сестре необходимо входить в процедурный зал, что приводит к значительному увеличению времени облучения для такого радиационного поля применяются только для методики ЗД КЛТ. При составлении плана облучения по методикам ЛТМИ и СЛТМИ предписанное комплексное дозовое распределение достигается путем создания дозовой карты (флюенса) с каждого поля путем неравномерного запланированного перемещения лепестков коллиматора ЛУ и использование дозомодулирующих устройств не требуется.

На основании проведенных исследований авторами установлено среднее время облучения по каждой из методик лучевой терапии для каждой из рассматриваемых локализаций (от 4 до 8 мин для 3Д КЛТ, от 4 до 8 мин для ЛТМИ, от 3 до 4 мин для СЛТМИ).

Заключение

Проведен ретроспективный анализ наиболее часто встречающихся в клинической практике онкологических учреждений Республики Беларусь типовых процедур облучения онкологических пациентов с использованием медицинского линейного ускорителя. Установлено распределение локализаций опухолевых очагов и методов дистанционного облучения радиотерапевтических пациентов с использованием ускорителей Trilogy № 3567 и Unique № 2015 в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова по частоте их применения.

Разработаны алгоритмы для оценки временных параметров сеанса лучевой терапии онкологического пациента на этапе его предлучевой подготовки с учетом индивидуальных особенностей лучевого лечения для каждой из наиболее применяемых в клинической практике отделения лучевой терапии РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова методик облучения.

Установлены компоненты сеансов лучевой терапии, оказывающие доминирующее влияние на ее временные характеристики при облучении по методикам 3Д КЛТ, ЛТМИ и СЛТМИ (количество радиационных полей, установка дозомодулирующих устройств, поворот терапевтического стола, длительность облучения одного радиационного поля, верификация положения пациента, инициализация ускорителя с параметрами облучения) и характеристики линейного ускорителя и плана облучения, от которых зависит длительность этих компонентов. Установлено среднее время облучения по каждой из методик лучевой терапии и рассматриваемых локализаций опухолевых очагов (от 4 до 8 мин для 3Д КЛТ, от 4 до 8 мин для ЛТМИ, от 3 до 4 мин для СЛТМИ).

Список использованных источников

1. The role of radiotherapy in cancer treatment: Estimating optimal utilization from a review of evidencebased clinical guidelines / G. Delaney [et al.] // Cancer. - 2005. - Vol. 104, № 6. - P. 1129–1137.

2. Лучевая терапия / Г.Е. Труфанов [и др.]; под ред. Г.Е. Труфанова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2012. – 208 с.

3. *Тарутин. И.Г.* Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии / И.Г. Тарутин, Е.В. Титович // Минск : Беларуская навука, 2015. – 175 с.

4. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures, International Commission On Radiation Units And Measurements. – Washington, D.C : ICRU, 1976. – Rep. 24.

5. Design and Implementation of a radiotherapy programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects [Electronic resource] / Intern. Atomic Energy Agency. – 1998. – Mode of access: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1040_prn.pdf. – Date of access: 20.01.2017.

6. Алгоритмы диагностики и лечения злокачественных новообразований : сб. науч. ст. / М-во здравоохранения Респ. Беларусь, Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н.Н. Александрова; под ред. О.Г. Суконко, С.А. Красного. – Минск: Профессиональные издания, 2012. – Вып. 2. – 508 с.

7. Comprehensive audits of radiotherapy practices: a tool for quality improvement [Electronic resource] / International Atomic Energy Agency. – 2007. – Mode of access: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/ Pub1297 web.pdf. – Date of access: 20.01.2016.

8. Stereotactic radiotherapy with real-time tumor tracking for non-small cell lung cancer: clinical outcome / N.C. Van der Voort [et al.] // Radiother. Oncol. – 2009. – Vol. 91, No. 3 – P. 296–330.

9. Transition from 2-D Radiotherapy to 3-D Conformal and Intensity Modulated Radiotherapy: IAEA-TECDOC-1588 / Intern. Atomic Energy Agency. – Vienna, 2008. – 68 p.

10. Varian Medical Systems I. Designers' Desk Reference. Version for TrueBeam STx. – Palo Alto, CA: Varian Medical Systems. – 2013. – Reference guide.

References

1. Delaney G., Jacob S., Featherstone C., Barton M. The role of radiotherapy in cancer treatment: Estimating optimal utilization from a review of evidencebased clinical guidelines. Cancer, 2005, vol. 104, pp. 1129–1137. **doi**: 10.1002/cncr.21324

2. Trufanov G.E., Asaturyan M.A., Zharinov G.M., Malahovskiy V.N. *Luchevaya terapiya* [Radiation therapy]. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2012, 208 p.

3. Tarutin I.G., Titovich E.V. *Primenenie lineinykh* uskoriteley elektronov v vysokotekhnologichnoi luchevoi terapii [The use of linear electron accelerators in high-tech radiation therapy]. Minsk, Belarusskaya Navuka Publ., 2015, 175 p.

4. International Commission On Radiation Units And Measurements. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures. Washington, D.C., ICRU, 1976, rep. 24. **doi**: 10.1093/jicru/ndh016

5. International Atomic Energy Agency. Design and Implementation of a radiotherapy programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects. Vienna, IAEA, 1998, 97 p.

6. Sukonko O.G., Krasny S.A. *Algoritmy diagnostiki i lecheniya zlokachestvennykh novoobrazovanii* [Algorithms for the diagnosis and treatment of malignancies] Minsk, Professionalnie izdaniya Publ., 2012, 508 p.

7. International Atomic Energy Agency. Comprehensive audits of radiotherapy practices: a tool for quality improvement. Vienna, IAEA, 2007, 94 p.

8. Van der Voort N.C., Prévost J.B., Hoogeman M.S., Praag J., van der Holt B., Levendag P.C., van Klaveren R.J., Pattynama P., Nuyttens J.J. Stereotactic radiotherapy with real-time tumor tracking for non-small cell lung cancer: clinical outcome Radiother. Oncol., 2009, vol. 91, pp. 296–330. doi: 10.1016/j.radonc.2009.02.011

9. International Atomic Energy Agency. Transition from 2-D Radiotherapy to 3-D Conformal and Intensity Modulated Radiotherapy: IAEA-TECDOC-1588 Vienna, IAEA, 2008, 68 p.

10. Varian Medical Systems International. Designers' Desk Reference. Version for TrueBeam STx. Palo Alto, CA, Varian Medical Systems, 2013, 206 p.

УДК 001.89:013(476)

Библиометрическое исследование публикаций работников Белорусского национального технического университета с помощью баз данных *Web of Scienc*e и *Scopus* и оценка эффективности их научной

деятельности: 2011-2015 гг.

Скалабан А.В., Юрик И.В., Лазарев В.С.

Белорусский национальный технический университет, Научная библиотека, ул. Я. Коласа, 16, Минск 220013, Беларусь

Поступила 20.12.2016 Принята к печати 08.02.2017

Продуктивность научных работников, ценность и качество научных публикаций рассматриваются как свойства, указывающие на эффективность научной деятельности организаций. Целью работы было выполнение библиометрического исследования продуктивности работников Белорусского национального технического университета (БНТУ), ценности и качества их публикаций, направленного на оценку эффективности научной деятельности университета.

С применением баз данных *Web of Science* и *Scopus* исследовали продуктивность авторов в 2011–2015 гг. (включая хронологическую структуру, распределение по журналам и издательствам, сведения о научном сотрудничестве и пр.), определяли среднюю цитируемость одной статьи; число статей, вошедших в 10 % наиболее цитируемых публикаций в мире в соответствующих научных областях и показатели «нормализованной цитируемости», в том числе в сравнении с другими университетами.

Выявлены прирост и высокая ценность публикаций университета, отраженных в базе данных *Web* of Science, а также высокая ценность ряда публикующих журналов. Совокупность полученных данных указывает на специалистов по лазерам как на научных лидеров БНТУ, а данные о продуктивности – на приборостроительный факультет как вносящий наибольший вклад в публикационный поток БНТУ, попадающий в наиболее авторитетные источники.

Результаты свидетельствует о достаточно высокой эффективности научной деятельности БНТУ. Серьезный вклад в повышение эффективности вносят меры по продвижению журналов БНТУ в мировое информационное пространство и по повышению «видимости» в нем специалистов БНТУ и результатов их исследований.

Ключевые слова: публикации Белорусского национального технического университета (БНТУ), продуктивность, цитируемость, библиометрические индикаторы, эффективность научной деятельности.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92

Адрес для переписки: Скалабан А.В. Белорусский национальный технический университет, Научная библиотека, ул. Я. Коласа, 16, Минск 220013, Беларусь e-mail: library@bntu.by	Address for correspondence: Skalaban A. Belarusian National Technical University, Scientific library, Ya. Kolas str., 16, Minsk 220013, Belarus e-mail: library@bntu.by
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Скалабан А.В., Юрик И.В., Лазарев В.С.	Skalaban A., Yurik I., Lazarev V.
Библиометрическое исследование публикаций работников Бело-	[Bibliometric study of publications of employees of the Belarusian
русского национального технического университета с помощью баз	National Technical University fulfilled with the use of the Web of
данных Web of Science и Scopus и оценка эффективности их научной	Science and Scopus databases and evaluation of the efficiency of their
деятельности: 2011–2015 гг.	research activities: 2011–2015].
Приборы и методы измерений.	<i>Pribory i metody izmerenii</i> [Devices and Methods of Measurements].
2017. – Т. 8, № 1. С. 81–92.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 81–92 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92

Bibliometric study of publications of employees of the Belarusian National Technical University fulfilled with the use of the Web of Science and Scopus databases and evaluation of the efficiency of their research activities: 2011–2015

Skalaban A., Yurik I., Lazarev V.

Belarusian National Technical University, Scientific library, Ya. Kolas str., 16, Minsk 220013, Belarus

Received 20.12.2016 Accepted for publication 08.02.2017

Abstract

The productivity of researchers, as well as the value and quality of scientific publications are considered as properties that indicate the efficiency of the research activities of an organization. The purpose of the present work was to perform a bibliometric study of productivity of Belarusian National Technical University (BNTU) researchers and of the value and quality of their publications. The study as a whole was aimed at assessing the efficiency of research activities of the BNTU.

With the use of the Web of Science and Scopus databases we examined the productivity of the authors in 2011–2015 (including chronological structure of publications and their journal and publishers distributions, data on scientific cooperation, etc.), determined the average citedness of an article; the number of articles included in the 10 % most cited publications in the world in different subject areas of science and also the magnitudes of the «normalized citation» (the latter being compared with the ones for other universities).

The growth of number of published articles and the high value of publications of the University were detected (as reflected in the Web of Science database), as well as the high value of a number of publishing journals. The obtained data as a whole attests to the leading role of laser specialists of the BNTU, and the productivity data attests to the Instrumentation Engineering Faculty as making the greatest contribution to the publications of the BNTU published in the most authoritative sources.

The results of the study attests to a fairly high efficiency of research activities of the BNTU. A significant contribution to improving the mentioned efficiency are being made by the promotion of the University journals to the world information networks and by facilitating the creation of «visibility» of the specialists of the BNTU and the results of their research in the world information networks.

Keywords: BNTU publications, productivity, citedness, bibliometric indices, research efficiency.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Скалабан А.В.	Skalaban A.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University, Scientific library,
Научная библиотека,	Ya. Kolas str., 16, Minsk 220013, Belarus
ул. Я. Коласа, 16, Минск 220013, Беларусь	e-mail: library@bntu.by
e-mail: library@bntu.by	
Для цитирования:	For citation:
Скалабан А.В., Юрик И.В., Лазарев В.С.	Skalaban A., Yurik I., Lazarev V.
Библиометрическое исследование публикаций работников Белорусско-	[Bibliometric study of publications of employees of the Belarusian
го национального технического университета с помощью баз данных	National Technical University fulfilled with the use of the Web of
Web of Science и Scopus и оценка эффективности их научной деятель-	Science and Scopus databases and evaluation of the efficiency of their
ности: 2011–2015 гг.	research activities: 2011–2015].
Приборы и методы измерений.	Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017. – T. 8, № 1. C. 81–92.	2017, vol. 8, no. 1, pp. 81–92 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92	DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-81-92

Введение

Целесообразность применения библиометрических индикаторов для оценки результатов научной деятельности перестала вызывать сомнения [1]. Как отмечалось в [2], библиометрические данные используются, среди прочего, для оценки результатов научных исследований и при составлении рейтингов вузов. Иными словами, применение библиометрических данных выступает в качестве одного из подходов к оценке эффективности научной деятельности научной организации (включая вуз).

Однако дискуссионными остаются вопросы о предпочтительности избираемых для оценки конкретных библиометрических индикаторов, равно как и об отображаемом ими конкретном оцениваемом свойстве, опосредовано указывающем на эффективность научной деятельности организации. О неупорядоченности трактовки свойств, отображаемых конкретными индикаторами, свидетельствуют, например, работы [3–5]. Немало может быть приведено и примеров различных конкретных путей выполнения соответствующих библиометрических исследований [6–12].

Нам представляется, что эффективность научной деятельности учреждения естественнее всего соотносить с ценностью научных документов (публикаций), создаваемых работающими в нем авторами [13]. В то же время, поскольку ценность научных публикаций может быть определена лишь в ретроспективе через уровень их цитируемости (документирующей состоявшееся конкретное использование) [14], изолированное применение цитат-анализа представляется недостаточным в контексте чисто утилитарного стремления к более оперативной оценке. Поэтому помимо ценности следует обратиться к оценке качества научных публикаций – свойства, оценка которого априорна, основана на сравнении признаков объектов с неким умозрительным стандартом (или «требованием») и зависит от познающего субъекта [14]. Качество научного документа может определяться как с помощью экспертной оценки, так и на основании формализованных признаков документа, указывающих на особенности их создания (например, среднее число привлеченных ссылок и индекс Прайса [15], признаки междисциплинарного характера публикации и многое другое) при наличии установленных вероятностных связей между выделенными признаками и предшествующими появлениями ценных документов со значениями данных признаков, превышающими пороговые.

По-видимому, определенная связь существует и между продуктивностью (т.е. числом публикаций [16]) совокупности авторов¹ и эффективностью их научной работы. Однако «часто обстоятельства вынуждают авторов искусственно увеличивать число публикаций. <...> Такая практика <...> способствует девальвации этого показателя» [17].

Целью данной работы было проведение библиометрического исследования публикаций работников Белорусского национального технического университета (БНТУ) для оценивания эффективности научной деятельности БНТУ. Работа выполнялась с учетом вышеизложенных положений.

Прикладное библиометрическое исследование публикаций работников Белорусского национального технического университета

Библиометрическое исследование публикаций работников БНТУ выполнялось на массиве документов, включенных в авторитетные базы данных (БД) *Scopus* и *Web of Science Core Collection (WoS CC)* за период с 2011 по 2015 гг.

За счет использования именно этих баз данных, осуществляющих весьма жесткий избирательный отбор периодических изданий, статьи из которых в них отражаются, продуктивность авторов из БНТУ рассматривалась весьма избирательно, т.е. применительно исключительно к статьям из наиболее качественных мировых источников. Таких работ всегда меньшинство, и полученные данные обеспечивают лишь относительную сравнительную оценку продуктивности. Но, по существу, это не недостаток, а преимущество, так как при таком подходе в определенной мере учитывалось качество самих публикаций: их попадание именно в эти базы данных свидетельствовало о том, что оно превысило определенный порог.

¹Работы, отражающие появившуюся тенденцию к разговорам о продуктивности ученых как якобы об их интегральной характеристике, практически «зависящей» от произвольного выбора библиометрических методов исследователями (см. например, [7, с. 22]), дела не меняют и тем более не могут отменить классического и логически непротиворечивого определения продуктивности [16].

Исследование по базе данных Scopus

Всего за рассматриваемый период в информационном потоке БД Scopus представлено 8472 публикации белорусских авторов, из них число публикаций работников БНТУ – 337 (обзоры, статьи в журналах и материалы конференций).

Наиболее продуктивные авторы из БНТУ: Юмашев К.В. (заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика», главный научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий, приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Кулешов Н.В. (заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология», главный научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий, приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Кисель В.Е. (заведующий НИЦ оптических материалов и технологий, доцент кафедры «Лазерная техника и технология», приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Ясюкевич А.С. (ведущий научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий, доцент кафедры «Лазерная техника и технология», приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Минченя В.Т. (профессор кафедры «Конструирование и производство приборов», приборостроительный факультет), Маляревич А.М. (проректор по научной работе, главный научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий, приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Горбаченя К.Н. (младший научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий, инженер кафедры «Лазерная техника и технология», приборостроительный факультет, специалист в области лазеров), Пустовалов В.К. (заведующий кафедрой «Инновационный менеджмент» Республиканского института инновационных технологий, известный, прежде всего, как специалист по лазерам). Преобладание в этом списке лазерной тематики и представителей приборостроительного факультета разительно; речь идет о явном лидерстве - как тематической области исследований, так и «институциональном».

Распределение отраженных в БД Scopus опубликованных работниками БНТУ статей по предметным областям знаний, принятым в этой БД, выглядит следующим образом: *Physics and Astronomy* – 55,5 %; *Engineering* – 42,1 %; *Materials Science* – 34,1 %; *Chemistry* – 16 %; Mathematics – 7,4 %; *Computer Science* – 5,3 %;

Chemical Engineering – 4,7 %; Biochemistry, Genetics and Molecular Biology – 3,6 %; Earth and Planetary Sciences – 3,3 %; Energy – 2,1 %²; другие области знаний – 3,6 %.

Большинство авторов БНТУ публикуются в изданиях крупнейших научных издательств: Elsevier, Springer, The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), American Institute of Physics (AIP), Optical Society of America (OSA), Wiley-Blackwell, издательствах институтов Национальной академии наук Беларуси, МАИК «Наука/ Интерпериодика». Надо отметить, что факт публикации в таких изданиях также косвенно свидетельствует о качестве публикаций, превысившем определенный «порог».

В период с 2011 по 2015 гг. работники БНТУ чаще публиковались в следующих журналах: Journal of Applied Spectroscopy – 12 публикаций, Laser Physics Letters – 10, Journal of Engineering Physics and Thermophysics – 9, Optics Letters – 9, Applied Physics B: Lasers and Optics – 8 и др.

В таблице 1 эти данные приведены более подробно. Следует отметить, что отнесенность журналов к квартилям Q1 и Q2 - не просто соответствие эталону; это мера цитируемости, а следовательно, мера ценности публикующих журналов. Из приведенных данных видно, что многие отраженные в БД Scopus публикации авторов из БНТУ относятся к журналам высокой ценности; тематика же отраженных в таблице журналов достаточно понятно указывает преимущественно на специалистов «лазерной школы» БНТУ, имеющих и персонально высокий уровень продуктивности: достаточно естественно, что они публикуются в ценных журналах. Приведенные журналы, представляющие иную тематику, не имеют, как правило, столь высокой репутации. Тем не менее необходимо отметить публикации по магнитогидродинамике и энергетике в известных международных журналах Magnetohydrodynamics и Przeglad *Elektrotechniczny* (хотя и с квартилем *Q*3).

²Мы умышленно воздерживаемся от перевода тематических областей, т.к. используемая западными коллегами терминология и сами системы классификаций порой настолько сильно не совпадают с привычными, что наличие перевода, «маскирующего» эти расхождения, может лишь усугубить дезориентацию читателя. Например, в предметную категорию Web of Science Journal Citation Reports «Nuclear Science and Technology» попадают как журналы по радиологической защите, так и журналы по атомной энергетике, которые, в свою очередь, не попадают в ожидаемую (с учетом нашего опыта) категорию «Energy and Fuels».

Таблица 1 / Table 1

Научные журналы, наиболее часто публиковавшие статьи работников БНТУ в 2011–2015 гг. (по БД *Scopus*) Scientific journals that most frequently published articles by employees of the BNTU in 2011-2015 (according to the Scopus data)

1 Название журнала Journal title	2 Количество статей	3 Издатель Publisher	4 Тематика журнала в соответствии с	5 Квартиль журнала ⁴ в соответствии с
	Number of papers		«категориями» Scimago ³ The subject areas of of the journal in accordance with the "categories" of Scimago	Scimago Journal & Country Rank Journal quartile in accordance with the Scimago Journal & Country Rank
Journal of Applied Spectroscopy ⁵	12	SPRINGER	Chemistry Spectroscopy Physics and Astronomy Condensed Matter Physics	Q4 Q4
Laser Physics Letters	10	IOP PUBLISHING LTD	Physics and Astronomy Instrumentation Physics and Astro- nomy (miscellaneous)	Q1 Q1
Journal of Engineering Physics and Thermophysics ⁶	9	SPRINGER	Engineering Engineering (miscel- laneous) Physics and Astronomy Condensed Matter	Q2 Q3
Optics Letters	9	OPTICAL SOC AMER	Physics Physics and Astronomy Atomic and Molecular Physics, and Optics	 Q1
Applied Physics B: Lasers and Optics	8	SPRINGER	Physics and Astronomy Physics and Astronomy (miscellaneous)	Q1
Laser Physics	8	IOP PUBLISHING LTD	Engineering Industrial and Manu-	Q2
			Physics and Astronomy Atomic and Molecular	Q2
			Physics, and Optics Condensed Matter Physics Instrumentation	Q2 Q2
Differential Equations	7	MAIK NAUKA/ INTERPERIODICA/ SPRINGER	Mathematics Analysis Mathematics (miscel- laneous)	Q3 Q3
Electronic Journal of Geotechnical Engineering	7	OKLAHOMA STATE UNIVERSITY	Earth and Planetary Sciences Geotechnical Engineering and Engineering Geology	Q3

³Исследовательская группа Scimago работает на основании данных БД Scopus.

⁵Перевод журнала «Журнал прикладной спектроскопии».

⁶Перевод журнала «Инженерно-физический журнал».

⁴Смысл значений «квартилей» в том, что «в системе ранговых индикаторов считается, что журналы, попавшие в первый квартиль, выше журналов <по значению его импакт-фактора, т.е. значения цитируемости средней статьи из журнала из числа опубликованных в течение двух предыдущих лет – Aem.>, попавших (не только в этой, но и в любой другой дисциплине) во второй квартиль и т.д. При этом журналы, попавшие в один и тот же квартиль в различных дисциплинах, считаются в рамках этого метода одинаковыми по научному уровню» [18, с. 96]. В российских научных кругах практикуется высокое материальное стимулирование публикаций статей в журналах с квартилями Q1 и Q2; т.е. факт публикации в таких журналах как бы подтверждает соответствие статей определенному эталону.

Таблица 1 / Table 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
Journal of Friction and Wear ⁷	7	ALLERTON PRESS INC	Engineering Mechanics of Materials Materials Science Surfaces, Coatings and	Q3
			Films	2 ²
Journal of Luminescence	6	ELSEVIER SCIENCE BV	Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	
			Biochemistry	Q2
			Biophysics	Q2
			Chemistry	01
			Physics and Astronomy	QI
			Atomic and Molecular	02
			Physics, and Optics	×-
			Condensed Matter Physics	Q2
Optics and Spectroscopy ⁸	6	MAIK NAUKA/	Materials Science	03
		SPRINGER	Magnetic Materials	Q3
			Physics and Astronomy	
			Atomic and Molecular	Q3
			Physics, and Optics	
Journal of Non-Crystalline	6	ELSEVIER SCIENCE BV	Materials Science	
Solids			Ceramics and Composites Electronic Optical and	Q1
			Magnetic Materials	Q2
			Physics and Astronomy	01
			Condensed Matter Physics	×1
			2	Q2
Magnetohydrodynamics	5	UNIV LATVIA INST	Engineering	
		PHYSICS	Electrical and Electronic	Q3
			Engineering	
			Physics and Astronomy	02
			(miscellaneous)	QS
Nonlinger Phonomone in	5		Mathematics	
Complex Systems	5	«АЛУКАНЫЯ І	Mathematical Physics	04
Complex Systems		ВЫХАВАННЕ»	Physics and Astronomy	<u> </u>
			Statistical and Nonlinear	
			Physics	Q4
Przeglad Elektrotechniczny	5	WYDAWNICTWO	Mathematics	
		SIGMA – N O T SP. Z O.O.	Analysis	Q3
			Mathematics	Q3
			(miscellaneous)	

Одной из наиболее характерных черт современного исследовательского процесса является, как известно, международное научное сотрудничество. Наибольшее количество публикаций учеными БНТУ подготовлено совместно с коллегами из России – 115, Германии – 46, Испании – 28, Польши – 14, Литвы и Швейцарии – по 9. Всего в БД *Scopus* зафиксирована 201 публикация в международном научном сотрудничестве, т.е. 59,5 %. На международном уровне наиболее успешным научное сотрудничество было с такими организациями, как⁹: *Universitat Rovira i Virgili; Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Max Born* Institute; Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS; Lomonosov Moscow State University; S.I. Vavilov State Optical Institute; Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the RAS; Saint Petersburg National Research University of Information Technologies; Mechanics and Optics University ITMO; Kaunas University of Technology и др. Наблюдалось сотрудничество со следующими национальными научными организациями: National Academy of Sciences of Belarus; Belarusian

⁷Перевод журнала «Трение и износа».

⁸Перевод журнала «Оптика и спектроскопия».

⁹Также используется написание БД Scopus.

State University; Belarusian State Technological University; Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; Vitebsk State Technological University; Solix Ltd. Сравнение полученных данных с перечнями ведущих стран и организаций в той области, в которой опубликованы такие соавторские работы, также может свидетельствовать об их качестве. Попытки подобного сравнения и дробления соавторских работ по тематическим направлениям в данной работе предпринято не было, что является недостатком, который мы попытаемся преодолеть в наших дальнейших исследованиях.

Для определения уровня цитируемости индексируемых в *Scopus* публикаций авторов БНТУ, отражающего документально подтвержденную ценность публикаций, за период с 2011 по 2015 гг. использовались такие показатели, как средняя цитируемость одной статьи и число статей, вошедших в 10 % наиболее цитируемых публикаций в мире в соответствующих научных областях (показатель, рассчитываемый сервисом *SciVal* – модулем производства издательства *Elsevier*). Результаты – в сравнении с аналогичными результатами для других белорусских университетов – представлены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

1 Организация Organization	2 Количество публика- ций (articles, reviews), 2011–2015 гг. ¹¹ Number of publications (articles, reviews), 2011–2015	3 Количество цитирова- ний, 2011–2015 гг. Number of citations, 2011–2015	4 Средняя цитируе- мость одной статьи The average citedness of an article	5 Количество публика- ций в 10 % наиболее цитируемых публи- каций аналогичной тематики (по сервису SciVal) The number of publications in the 10 % most cited publications of similar subjects (according to SciVal)
Гомельский государ- ственный медицин- ский университет Gomel State Medical University	46	206	4,47	7
Брестский государ- ственный универси- тет им. А.С. Пушкина Brest State University named after A.S. Pushkin	29	113	3,89	4
Белорусский нацио- нальный технический университет Belarusian National Technical University	242	652	2,69	26
Белорусский государ- ственный медицин- ский университет Belarusian State Medical University	75	193	2,57	6
Гродненский государ- ственный универси- тет им. Янки Купалы Yanka Kupala State University of Grodno	93	228	2,45	1

Цитируемость публикаций белорусских университетов, рассчитанная по данным Scopus¹⁰ Citedness figures of publications of Belarusian universities calculated according to Scopus data

¹⁰Данные представлены в порядке убывания значения показателя «средняя цитируемость одной статьи».

The data are presented in descending order of the value of the «average citedness of an article» indicator.

¹¹Без материалов научных конференций. Without conference materials.

Таблица 2 / Table 2 (продолжение)

1	2	3	4	5
Белорусский государ- ственный университет Belarusian State University	1435	3475	2,42	128
Гомельский государ- ственный техниче- ский университет П.О. Сухого Sukhoi State Technical University of Gomel	50	104	2,08	3
Гродненский государ- ственный медицин- ский университет Grodno State Medical University	111	213	1,91	7

Рассчитанное по данным Scopus значение первого показателя в 2011–2015 гг. составило 2,69. Это значение обеспечивает Белорусскому национальному техническому университету 3-е место среди белорусских университетов. (На 1-м месте – Гомельский государственный медицинский университет со значением показателя, равным 4,47; 2-е место у Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина – 3,89.) Можно считать, что третье место по ценности в стране среди университетов занимают научные публикации БНТУ.

По второму показателю БНТУ занимает 2-е место в стране среди университетов: в 10 % наиболее цитируемых публикаций в мире в соответствующих научных областях входит 26 публикаций БНТУ, что составляет 10,7 % от всего числа опубликованных работ БНТУ, отраженных в БД Scopus за исследуемый период. Это можно условно интерпретировать как второе место в стране по ценности его цитируемых публикаций среди самых ценных публикаций в мире. Для сравнения укажем, что в 10 % наиболее цитируемых публикаций в мире от БГУ вошли 128 публикаций (8,9 % от всего числа опубликованных работ учеными БГУ).

Самая цитируемая статья в массиве документов, включенных в Scopus, за все время имеет 248 цитирований: *Kuleshov, N.V., Lagatsky, A.A., Podlipensky, A.V., Mikhailov, V.P., Huber, G. Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO*₄)₂ and KGd(WO₄)₂ (1997) Optics Letters, 22 (17), pp. 1317–1319¹². Здесь уже знакомы и тематика исследований, и весьма авторитетный журнал, упоминавшийся выше. Исследование по Web of Science Core Collection (WoS CC)

При рассмотрении отраженного в этой БД информационного массива за период с 2011 по 2015 гг. были проанализированы следующие аспекты: динамика потока публикаций ученых БНТУ по данным *WoS CC*, отражающая их продуктивность, и так называемая «нормализованная цитируемость»¹³ публикаций по предметным областям в сравнении с другими учреждениями и по БНТУ, отражающая ценность научной продукции исследователей университета.

Число статей, опубликованных авторами из БНТУ, отраженных в *WoS CC* за рассматриваемый период, составило 329¹⁴. С 2011 г. наблюдается положительная динамика продуктивности: в 2011 – 53, в 2012 – 56, в 2013 – 62. Исключение составляет 2014 г.: наблюдалось падение числа публикаций до 45. В 2015 г. наблюдается увеличение до 113 публикаций. Это связано с включением двух научных журналов, издаваемых БНТУ, – «Наука и техника» и «Приборы и методы измерений» – в БД *Emerging Sources Citation Index (ESCI)*, которая является частью *WoS CC*.

¹⁴Меньшая величина, нежели по данным БД *Scopus*, обусловлена более жестким отбором источников в *WoS CC*.

¹²Приводится в описании, приведенном в *Scopus*.

¹³«Нормализованная цитируемость» – это усредненное значение цитируемости для разных областей знания. Среднемировой его уровень равен по определению единице. Появление индикатора вызвано необходимостью «решения двух важных задач: а) сравнение между собой исследовательских единиц, работающих в разных отраслях науки; б) комплексная оценка деятельности организации, занимающейся исследованиями сразу в нескольких научных областях» [18, с. 90].

Рост видимой в авторитетнейшей мировой базе данных продуктивности БНТУ может быть связан с усилиями БНТУ по продвижению издаваемых им журналов в мировое информационное пространство.

Для сравнения статей, ученых и организаций, работающих в разных предметных областях, использовались «нормализованные» показатели цитирования, полученные с помощью аналитического сервиса InCites компании Clarivate Analytics (бывш. the IP & Science Business of Thomson Reuters). Анализ белорусских университетов показал, что по показателю «нормализованное цитирование по всем предметным областям», среднемировой уровень которого равняется 1, БНТУ занимает первое место в стране – 0,54. На втором месте – БГУ с показателем 0,51, на третьем – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (0,32), на четвертом – Белорусский государственный медицинский университет (0,29), на пятом – Белорусский государственный технологический университет (0,18).

Анализ «нормализованных» показателей цитирования по предметным областям (тематическим категориям в классификации WoS) по БНТУ выявил следующее: самый высокий показатель, превышающий среднемировой уровень, у статей с предметной областью Optics - 1,25. Данные по другим областям: *Physics*, *Applied*-0,61; *Materials* Science, Multidisciplinary - 0,48; Mechanics -0,47; Physics, Physics, Fluids & Plasmas – 0,47; Engineering, Mechanical – 0,19; Engineering, *Electrical & Electronic* – 0,16; *Spectroscopy* – 0,16; Nanoscience & Nanotechnology $-0,2^{15}$; другие предметные области – 0,54. Эти данные, прежде всего, подтверждают «уровень» (ценность) исследований БНТУ, выполняемых представителями «лазерной школы» БНТУ.

Некоторые результаты, связанные с продвижением научных журналов БНТУ в мировое информационное пространство

Определенные успехи в росте продуктивности БНТУ и использования публикаций его авторов мировым сообществом, отмеченные выше, связаны, как нам представляется, с усилиями по продвижению издаваемых БНТУ журналов в мировое информационное пространство

В апреле 2014 г. был запущен проект «Журналы БНТУ» на издательской платформе *OJS*

(Open Journal Systems). С 2015 г. осуществлен переход проекта на издательскую платформу Некоммерческого партнерства «Национальный электронно-информационный Консорциум» (НЭИКОН, Россия) - ejournal.by. Все 5 научных журналов БНТУ имеют отдельные сайты и мобильные приложения. Статистика открытий полных текстов статей в период с 01.01.2016 по 01.11.2016 такова: журнал «Литье и металлургия» – открывался 15 681 раз; «Энергетика» – 14 332; «Наука и техника» - 13 570; «Приборы и методы измерений» - 7 189; «Системный анализ и прикладная информатика» – 2 366. Эти цифры разительно превышают тиражи бумажных копий и свидетельствуют о серьезной востребованности публикуемых материалов.

Журналы также индексируются в различных мировых каталогах и базах данных: Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU, Киберленинка, Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань, Crossref, Google Scholar, EBSCO, BASE Search, OpenAIRE, WorldCat, OpenDOAR, ROAR, DOAJ. Журналы «Наука и техника» и «Приборы и методы измерений», как указывалось, вошли в Web of Science Emerging Sources Citation Index. Всем статьям журналов «Приборы и методы измерений», «Энергетика» и «Наука и техника» присваиваются цифровые идентификаторы объекта DOI (об их значении и широких возможностях использования см. [19]). Эти и другие меры по продвижению журналов в мировое информационное пространство не только уже принесли определенные результаты по повышению видимости, доступности и востребованности работ специалистов БНТУ, но, как ожидается, принесут еще бо́льшие результаты в будущем.

Другим путем повышения видимости результатов исследований, проводимых в БНТУ, является регистрация профилей работников в системах *Google Scholar, SCIENCE-INDEX* (РИНЦ), *ORCID* и *ResearcherID* (инструкции находятся на сайте Научной библиотеки БНТУ в разделе «Публикационная активность» / «Инструменты идентификации авторов» – <u>http://library.bntu.by/</u> instrumenty-identifikacii-avtorov).

Заключение

Рассмотрены такие свойства совокупностей научных публикаций и журналов, как продуктивность, ценность и качество, и показано, как ком-

¹⁵*Web of Science* использует собственную классификацию, не совпадающую с классификацией БД *Scopus*. См. сноску 2.

бинации библиометрических индикаторов отражают эти свойства, что делает эти индикаторы пригодными для оценки эффективности научной деятельности организаций.

Данные об издательствах, в которых публикуются авторы БНТУ, полученные с применением базы данных *Scopus*, подтверждают высокое качество этих публикаций, а данные о цитируемости этих публикаций, отражаемой в той же базе данных, – их высокую ценность.

Данные о цитируемости журналов, в которых публикуются авторы БНТУ, полученные с применением базы данных *Web of Science Core Collection*, а также данные о цитируемости самих авторов, подтверждают высокую ценность публикаций БНТУ, отраженных в *WoS CC*, а также ряда публикующих их журналов.

Совокупность полученных данных указывает на специалистов по лазерам как на научных лидеров БНТУ, а данные о продуктивности – на приборостроительный факультет как вносящий наибольший вклад в публикационный поток БНТУ, попадающий в наиболее авторитетные источники.

Совокупность полученных данных свидетельствует о достаточно высокой эффективности научной деятельности БНТУ.

Серьезный вклад в повышение эффективности вносят меры по продвижению журналов БНТУ в мировое информационное пространство и по повышению видимости специалистов БНТУ и результатов их исследований в мировом информационном пространстве.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующей научно-библиографическим отделом Научной библиотеки БНТУ Н.С. Дыдик за участие в сборе и обработке данных.

Список использованных источников

1. Москалева, О.В. Можно ли оценивать труд ученых по библиометрическим показателям? / О.В. Москалева // Управление большими системами : сборник трудов. – М., 2013. – Вып. 44: Наукометрия и экспертиза в управлении наукой. – С. 308–331.

2. *Скалабан, А.В.* Проблемы идентификации данных в индексах цитирования и пути их решения / А.В. Скалабан, И.В. Юрик // Вышэйшая школа. – 2015. – № 6. – С. 25–29.

3. Коцемир, М.Н. Публикационная активность российских ученых в ведущих мировых журналах /

М.Н. Коцемир // Acta Naturae. – 2012. – Т. 4, № 2 (13). – С. 15–35.

4. *Березкина, Н.* Анализ публикационной активности ученых Беларуси с использованием баз данных «Web of Science» / Н. Березкина, Г. Хренова // Информационные ресурсы России. – 2008. – № 4. – С. 18–21.

5. *Смолина, С.Г.* Анализ публикационной активности и опыт организации мониторинга Южно-Уральского государственного университета / С.Г. Смолина // Библиосфера. – 2013. – № 2. – С. 82–87.

6. Зусьман, О.М. Библиометрический анализ деятельности научных школ / О.М. Зусьман, Т.В. Захарчук // Оптимизаци информационно-библиографического обслуживания ученых и специалистов : сб. науч. тр. – Новосибирск, 2000. – С. 116–131.

7. *Свирюкова, В.Г.* Индекс цитируемости: разные методики – разные результаты / В.Г. Свирюкова // Научно-техническая информация. Сер. 1. Организация и методика информационной работы. – 2004. – № 2. – С. 22–25.

8. Шабурова, Н.Н. Библиометрический анализ научных достижений СО РАН / Н.Н. Шабурова // Современные исследования социальных проблем. – 2010. – № 3 (03). – С. 101–105.

9. *Третьякова, О.В.* Возможности РИНЦ для оценки публикационной активности научного учреждения / О.В. Третьякова // Индексы научного цитирования: возможности и перспективы в оценке результатов научной деятельности: препринт / О.В. Третьякова. – Вологда : ИСЭЗТ РАН, 2014. – С. 12–22.

10. *Третьякова, О.В.* Современные инструменты оценки научного потенциала территории: наукометрический подход / О.В. Третьякова // Проблемы развития территории. – 2014. – Вып. 4 (72). – С. 7–16.

11. *Ибраев, А.Ж.* Влияние импакт-фактора журнала на цитируемость казахстанских публикаций / А.Ж. Ибраев [и др.] // Научно-техническая информация. Сер. 1. Организация и методика информационной работы. – 2014. – № 8. – С. 26–34.

12. *Рахимова, Н.М.* Анализ публикационной активности научно-исследовательского института / Н.М. Рахимова // Научные и технические библиотеки. – 2016. – № 11. – С. 44–50.

13. К методике оперативной оценки научной деятельности научно-исследовательских учреждений / В.С. Лазарев [и др.] // Вопросы библиографоведения и библиотековедения : межвед. сб. – Минск : Университетское, 1993. – Вып. 14. – С. 16–27.

14. Лазарев, В.С. Цитируемость – использование – ценность // Материалы IV Международного конгресса «Библиотека как феномен культуры» : Информационные ресурсы библиотек в образовательной, научной и социокультурной среде, Минск, 4–6 октября 2016 г. / Национальная библиотека Беларуси ; сост. А.А. Суша. – Минск, 2016. – С. 120–131.

15. *Прайс, Д.С.* Квоты цитирования в точных и неточных науках, технике и не-науке / Д.С. Прайс // Вопросы философии. – 1971. – № 3. – С. 149–155.

16. Bradford, S.C. Documentation / S.C. Bradford. – 2nd ed. – London : Lockwood, 1953. – P. 141–159.

17. Васильев, Р.Ф. О количестве публикаций и частоте их цитирования как наукометрических показателях / Р.Ф. Васильев // Материалы к симпозиуму «Исследование операций и анализ развития науки». – М., 1967. – Ч. 1: Методы анализа развития науки. – С. 60–69.

18. Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии / М.А. Акоев [и др.]; под. ред. М.А. Акоева. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 250 с.

19. DOI в современной научной коммуникации / А.С. Викулин [и др.] // Университетская книга. – 2016. – Декабрь. – С. 56–61.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Head of Scientific bibliography department of the BNTU Scientific library N.S. Dydik for participation in data collection and processing.

References

1. Moskalyeva O.V. [Is it possible to evaluate the work of scientists according to bibliometric indicators?]. *Upravlyenye bol'shimi sistemami. Sbornik trudov. Vypusk 44. Naukometriya i ekspertiza v upravlyeniyi naukoi* [Control of large systems. Issue 44. Scientometrics and expertise in the management of science]. Moscow, Inst. of Manag. Probl., 2013, pp. 308–331 (in Russian).

2. Skalaban A.V., Yurik I.V. [The problems of data identifying in citation indexes and ways of to solve them]. *Vysheishaya shkola* [The higher school], 2015, no. 6, pp. 25–29 (in Russian).

3. Kotsemir M.N. Publication Activity of Russian Researches in Leading International Scientific Journals. *Acta Naturae*, 2012, vol. 4, no. 2(13), pp. 14–34.

4. Beryezkina N., Khrenova G. [Analysis of publication activity of Belarusian scientists with use of the Web of Science databases]. *Informatsionnye resursy Rossiyi* [Information resources of Russia], 2008, no 4, pp. 18–21 (in Russian).

5. Smolina S.G. [Analysis of publication activity and the experience of the organization of monitoring of the Southern Ural State University]. *Bibliosfera* [Bibliosphere], 2013, no. 2, pp. 82–87 (in Russian).

6. Zus'man O.M., Zakharchuk T.V. [Bibliometric analysis of research schools activities]. *Optimizatsiya informatsionno-bibliograficheskogo obsluzhivania uchenykh i spetsialistov. Sb. nauch. tr.* [Optimization of information and bibliographic service for scientists and specialists. Collected works]. Novosibirsk, 2000, pp. 116– 131 (in Russian).

7. Sviryukova V.G. [Citation index: different methods and different results]. *Nauchnaya i technicheskaya* *informatsiya. Ser. 1. Organizatsiya i metodika informatsionnoi raboty* [Scientific and technical information. Ser.1. Organization and methods of information work], 2004, no. 2, pp. 22–25 (in Russian).

8. Shaburova N.N. [Bibliometric analysis of scientific achievements of Siberian branch of the Russian Academy of Sciences]. *Sovryemyennye issledovanyia sotsial'nykh problem* [Modern research of social problems], 2010, no 3 (03), pp. 101–105 (in Russian).

9. Tretyakova O.V. [The ability of RISC to assess the publication activity of scientific institutions]. Tretyakova O.V. *Indeksy nauchnogo tsitirovaniya: vozmozhnosti i perspektivy v otsenke rezul'tatov nauchnoi deyatel'nosti* [Citation indices: opportunities and prospects for the evaluation of scientific results]. Vologda, Institute of Socio-Economic Development of Territories of the Russian Academy of Sciences, 2014, pp. 12–22 (in Russian).

10. Tretyakova O.V. [Modern tools of assessing the scientific potential of the territory: a scientometric approach]. *Problemy razvitya territoriyi* [Problems of the territory development], 2014, vol. 4 (72), pp. 7–16 (in Russian).

11. Ibrayev A.Zh., Kibiyeva T.Sh., Kozbagarova G.A., Ponomareva N.I. [Effects of the impact factor of the journal citation index of Kazakhstan publications]. *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Ser. 1. Organizatsiya i metodika informatsionnoi raboty* [Scientific and technical information. Ser.1. Organization and methods of information work], 2014, no. 8, pp. 26–34 (in Russian).

12. Rakhimova N.M. [Analysis of publication activity of a research institute]. *Nauchnye i tekhnicheskie biblioteki* [Research and technical libraries], 2016, no. 11, p. 44–50 (in Russian).

13. Lazarev V.S. Gordiyenko G.P., Karas G.A., Yunusova D.A., Nasonova T.N. [Towards the method of rapid assessment of scientific activity of scientific research institutions]. *Voprosy bibliografovedeniya i bibliotekovedeniya. Mezhved. sb.* [Problems of Bibliography Science and Librarianship. Interdepartmental collection.]. Minsk, Universitetskoye Publ., 1993, vol. 14, pp. 16–27 (in Russian).

14. Lazarev V.S. [Citedness – use – value]. Materialy IV mezhdunarodnogo kongressa «Biblioteki kak fenomen kul'tury» – «Informatsionnye resursy bibliotek v obrazovatel'noi, nauchnoi i sotsiokul'turnoi sredye» [International «Library as a cultural phenomenon» Congress: «Information resources of libraries in the educational, scientific and socio-cultural environment»]. Minks, National Library of Belarus, 2016, pp. 120–131 (in Russian).

15. Price D. J. de Solla. Citation measures of hard science, soft science, technology and nonscience. Nelson C.E., Pollock D.K. (ed.). *Communication Among Scientists and Engineers*. Lexington, Mass.: Heath Lexington, 1970, pp. 3–22.

16. Bradford S.C. *Documentation*. 2nd ed. London, Lockwood, 1953, pp. 141–159.

17. Vasil'ev R.F. [On the number of publications and frequency of citation as scientometric indicators]. *Materialy k simpoziumu «Issledovanie operatsii i analiz razvitiya nauki». Ch.1: Metody analiza razvitiya nauki.* [Materials towards the Symposium «Operations research and analysis of the development of science». Part 1. Methods of science development analysis]. Moscow, 1967, pp. 60–69 (in Russian). 18. Akoev M., Markusova V., Moskaleva O., Pisyakov V. *Rukovodstvo po naukometrii: indikatory razvitiya nauki i tekhnologii* [Scientometrics Manual: Indices of Science and Technology Development]. Yekaterinburg, Ural University Publ., 2014, 250 p. (in Russian).

19. Vikulin A.S., Dimentov A.V., Mitrofanov M.I., Skalaban A.V. [DOI in modern research communications]. *Universitetskaya kniga* [University book], 2016, December, pp. 56–61 (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ от 28.02.2014 г. № 3

 Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объём статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200-250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть: заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и чётким. Фотографии представляются в электронном виде (формат tif, jpg, cmyk, разрешение не менее 300 dpi). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «*a*», «*b*» и т.д. Подписи к рисункам даются на отдельном листе на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе Microsoft Equation Editor, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **прямо** набираются греческие и русские буквы (в т.ч. в индексе), математические символы, символы химических элементов; **курсивом** набираются латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе); жирным шрифтом – векторы (стрелки вверху не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора *DOI*, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи. 1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in one of graphical formats (tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be taped in Microsoft Equation Editor.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

