

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 10

№ 4

Vol. 10

2019

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 10

№ 4

2019

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Кулешов Н.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
- Кучинский П.В.**, д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
- Кэмп А.**, профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)
- Матеос Х.**, к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)
- Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)
- Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
- Погребняк А.Д.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нанoeлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)
- Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)
- Тимчик Г.С.**, д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (г. Киев, Украина)
- Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)
- Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)
- Шкадаревич А.П.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)
- Юмашев К.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

ISSN 2220-9506

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».

Подписные индексы – 74835; 748352.

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Редактор: Чабарова О.Л.

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

Подписано в печать ..2019. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 130 экз.

Дата выхода в свет2019. Заказ №

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 10

№ 4

2019

EDITOR-IN-CHIEF

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

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Xavier Mateos, PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

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

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

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

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

Gryhoriy S. Tymchyk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Instrumentation Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

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

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

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

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

ADDRESS:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>К.Н. Gorbachenyа, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk</i>	
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal	301
<i>И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая</i>	
Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта	308
<i>Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский</i>	
Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого р–п–р-транзистора на его реактивный импеданс.....	322
<i>А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников</i>	
Моделирование работы навигационного приёмника для сверхмалого космического аппарата	331
<i>В.О. Китиков, Е.В. Тернов, А.В. Даниленко, Н.И. Мухуров, С.В. Денисюк</i>	
Новые функциональные возможности пожарных извещателей для жилых и промышленных помещений	341
 Методы измерений, контроля, диагностики	
<i>М. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski, T.N. Koltunowicz</i>	
Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.....	353
<i>А.Р. Баев, Н.В. Левкович, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая</i>	
Рассеяние упругих волн неоднородной границей при акустическом контроле неразъёмных соединений.....	360
<i>R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A.Kozhevnikov, V.M. Medina, R. Delgado</i>	
Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search.....	373
<i>А.А. Антошин, В.И. Никитин</i>	
Методика исследования динамики изменения параметров задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение.....	382
<i>А.И. Куцак</i>	
Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена.....	391

CONTENTS

Measuring Instruments

<i>K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk</i>	
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal.....	301
<i>I. Gilavdary, S. Mekid., N. Riznookaya</i>	
Device and Measuring Method the Moments of Rolling Resistance Forces on the Contact Spot.....	308
<i>N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski</i>	
Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance.....	322
<i>A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saechnikov</i>	
Simulation of Navigation Receiver for Ultra-Small Satellite.....	331
<i>V.O. Kitikov, E.V. Ternov, A.V. Danilenko, N.I. Mukhurov, S.V. Denisyuk</i>	
New Functional Possibilities of Fire Detectors for Residential and Industrial Rooms.....	341

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

<i>M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski, T.N. Koltunowicz</i>	
Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.....	353
<i>A.R. Baev, N.V. Levkovich, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya</i>	
Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary in the Acoustic Testing of Permanent Joints.....	360
<i>R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A. Kozhevnikov, V.M. Medina, R. Delgado</i>	
Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search	373
<i>A.A. Antoshyn, V.I. Nikitin</i>	
Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion.....	382
<i>A.I. Kitsak</i>	
Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions.....	391

Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal

K.N. Gorbachenya¹, V.E. Kisel¹, R.V. Deineka¹, A.S. Yasukevich¹, N.V. Kuleshov¹,
V.V. Maltsev², D.D. Mitina², E.A. Volkova², N.I. Leonyuk²

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

²Department of Crystallography and Crystal Chemistry, Moscow State University,
119992 GSP-2 Moscow, Russia

Received 14.10.2019

Accepted for publication 28.11.2019

Abstract

We report, for the first time to our knowledge, a diode-pumped continuous-wave microchip Er,Yb:YMgB₅O₁₀ laser. The purpose of this work was to study the growth technique, spectroscopic properties and continuous-wave laser performance of Er³⁺, Yb³⁺:YMgB₅O₁₀ novel crystal.

Absorption and luminescence spectra as well as kinetics of luminescence decay were studied. Ytterbium-erbium energy transfer efficiency was determined. The output characteristics (output power, slope efficiency, laser wavelength) of Er³⁺, Yb³⁺:YMgB₅O₁₀ laser were determined.

Two intensive absorption bands with peaks centered at 937 nm and 976 nm were observed in the absorption spectra at the wavelength near 1 μm. The maximum value of absorption cross-section was determined to be 1.5·10⁻²⁰ cm² at 976 nm for polarization $E//N_g$. A number of narrow lines were observed in the absorption spectra in the 1425–1575 nm spectral range (transition ⁴I_{15/2} → ⁴I_{13/2} of erbium ions). The lifetime of the upper laser level ⁴I_{13/2} of Er³⁺ ions was determined to be 390 ± 20 μs. The ytterbium-erbium energy transfer efficiency for YMgB₅O₁₀ crystal with 2 at.% of Er³⁺ and 11 at.% for Yb³⁺ was close to 84 %. The maximal continuous-wave output power of 0.2 W with slope efficiency of 8 % regarding to absorbed pump power was realized at the wavelength of 1570 nm. With the improvement of cavity parameters the output laser performance of the Er,Yb:YMgB₅O₁₀ crystal can be further enhanced.

Taking into account high thermal conductivity of ≈ 6.2 W·m⁻¹·K⁻¹, the Er,Yb:YMgB₅O₁₀ crystal can be considered as a good gain medium for 1.5 μm lasers for applications in laser rangefinder and LIDAR systems.

Keywords: erbium, ytterbium, borate crystals, spectroscopy, diode-pumped, continuous-wave laser operation.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

Адрес для переписки:

К.Н. Горбаченя
Центр оптических материалов и технологий, Белорусский
национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: gorby @bntu.by

Address for correspondence:

Gorbachenya K.N.
Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National
Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby @bntu.by

Для цитирования:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich,
N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk.
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal.
Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 4. – С. 301–307.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

For citation:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich,
N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk.
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal.
Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 4, pp. 301–307.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

УДК 621.3.038.825.2

Непрерывный лазер на кристалле пентабората, соактивированного ионами эрбия и иттербия

К.Н. Горбаченя¹, В.Э. Кисель¹, Р.В. Дейнека¹, А.С. Ясюкевич¹, Н.В. Кулешов¹,
В.В. Мальцев², Д.Д. Митина², Е.А. Волкова², Н.И. Леонюк²

¹Центр оптических материалов и технологий,
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва 119991, Россия

Поступила 14.10.2019

Принята к печати 28.11.2019

Впервые сообщается о непрерывном лазере на кристалле Er,Yb:YMGb₅O₁₀ с диодной накачкой. Изучены условия синтеза кристаллов, спектры поглощения и люминесценции, кинетики затухания люминесценции. Определена эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Определены выходные характеристики (выходная мощность, дифференциальный КПД, длина волны генерации) лазера на основе кристалла Er³⁺,Yb³⁺:YMGb₅O₁₀.

В спектрах поглощения в области 1 мкм наблюдаются две интенсивные полосы поглощения с пиками на длинах волн 937 нм и 976 нм. Максимальное поперечное сечение поглощения достигает $1.5 \cdot 10^{-20}$ см² на длине волны 976 нм для поляризации $E//N_g$. В спектре поглощения в спектральной области 1425–1575 нм наблюдается набор узких полос поглощения. Измеренное время жизни верхнего уровня ⁴I_{13/2} ионов Er³⁺ составило 390 ± 20 мкс. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия для кристалла Er(2 ат.%),Yb(11 ат.%):YMGb₅O₁₀ достигала 84 %. Максимальная выходная мощность лазерной генерации на длине волны 1570 нм составила 0,2 Вт при дифференциальном КПД 8 %.

Благодаря высокой теплопроводности (≈ 6.2 Вт·м⁻¹·К⁻¹) кристалла Er,Yb:YMGb₅O₁₀, он может быть с успехом использован в качестве активной среды для лазеров дальномерных систем и ЛИДАРов.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, бораты, спектроскопические исследования, диодная накачка, непрерывная лазерная генерация.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

Адрес для переписки:

К.Н. Горбаченя
Центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Address for correspondence:

K.N. Gorbachenya
Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby@bntu.by

Для цитирования:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich,
N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk.
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 301–307.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

For citation:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, R.V. Deineka, A.S. Yasukevich,
N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, D.D. Mitina, E.A. Volkova, N.I. Leonyuk.
Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal.
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 301–307.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307

Introduction

Nowadays eye-safe lasers emitting in 1.5–1.6 μm spectral range find application in LIDAR systems for robots, self-driving cars, etc. due to its eye-safety and high transparency of the atmosphere. Currently, many sources are emitting in this spectral range, but solid-state lasers on Er^{3+} and Yb^{3+} -codoped crystals are of greatest interest. Phosphate glasses currently are the leading Er^{3+} , Yb^{3+} -codoped laser materials, because they combine very efficient energy transfer from Yb^{3+} to Er^{3+} ions ($\eta \approx 90\%$) with a long lifetime of the erbium upper laser level $^4I_{132}$ (7–8 ms) and short lifetime of the $^4I_{11/2}$ energy level (2–3 μs), which prevents the depopulation of this level because of excited-state absorption and upconversion processes [1]. However, phosphate glass has poor thermomechanical properties (a thermal conductivity of $0.85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) [2], which limits the average output power of Er,Yb:glass lasers because of the thermal effects. A maximal continuous-wave (CW) output power did not exceed 353 mW with a slope efficiency of 26% [3]. For this reason, the search for new crystalline hosts for Er,Yb-codoping is ongoing.

Due to their spectroscopic characteristics and high thermal conductivity, Er,Yb-codoped borate crystals are most widely used crystalline laser media for lasers operating in the 1.5–1.6 μm spectral range. To date, effective laser operation has been obtained by using various erbium, ytterbium codoped borate crystals [4–9]. By using of Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ crystal the maximal output power in continuous-wave mode exceeded 1.5 W with the slope efficiency of about 35% [9]. Recently, one more borate crystal YMgB₅O₁₀ (YMBO) has been regarded as a potential laser host material owing to large thermal conductivity ($6.2 \pm 0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) and good optical properties [10]. Moreover, in comparison with huntite-type borates, YMBO bulk crystals of large enough with good optical quality can be obtained reproducibly by optimizing the crystal growth conditions.

In this paper the laser related spectroscopy and, for the first time to our knowledge, continuous-wave laser performance of Er,Yb:YMgB₅O₁₀ crystal are presented.

Experimental details

Crystal growth

Er,Yb:YMBO (Er = 2.0 at.%, Yb = 11 at.%) single crystals were obtained by high-temperature

solution growth on dipped seeds (SGDS) from K₂Mo₃O₁₀ flux melt. The ratio of the raw materials was Er,Yb:YMgB₅O₁₀: K₂Mo₃O₁₀ = 80:20 wt.%. The growth technique follows Ref. [10]. The chemicals used (at least 99.996% and 99.99% purity for rare earth and other materials, respectively) were R₂O₃ (R = Y, Yb, Er), MgO and B₂O₃, but K₂Mo₃O₁₀ was previously sintered from K₂MoO₄ (99.0%) and H₂MoO₄ (99.5%) at 650 °C for 24 h by a scheme:



The starting charge was placed into a platinum crucible of 250 ml in volume and heated to a maximum temperature which is normally 100–150 °C above the expected saturation point. After the solution homogenization within 10–20 hours, the saturation temperature (T_{sat}) was accurately determined by dipping a trial YMBO crystal in the solution, and it was kept at constant temperature by observing growth/dissolution of the crystal face at different temperatures. The T_{sat} were found from the experimental data on changes both in weight and micro-relief of the probe seeds after soaking in fluxed melts from 10 min to several hours, depending on an expected deviation from their equilibrium state. The obtained value of T_{sat} was about ≈ 950 °C for the solute concentration being investigated. As a result visually macrodefect-free Er,Yb:YMBO single crystal was grown. The dimensions of the crystal obtained were typically 20×15×10 mm (Figure 1).

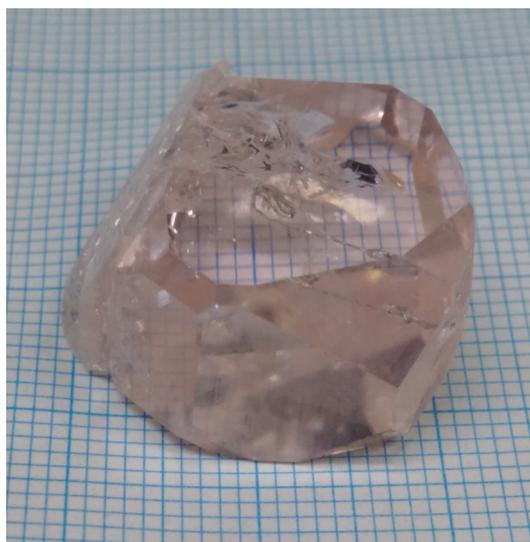


Figure 1 – The Er,Yb:YMBO crystal grown by the SGDS method

Investigation of spectroscopic characteristics

In our study polarized absorption spectra of Er,Yb:YMBO crystal at room temperature were registered by a Varian CARY-5000 spectrophotometer in the spectral ranges 875–1025 nm and 1425–1575 nm. The spectral bandwidth was 0.5 nm. Two polished plates with dimensions of $5 \times 7 \times 2 \text{ mm}^3$ oriented along three principal optical indicatrix axes N_g , N_m and N_p were used. The concentration of doping ions in the crystal was determined by means of a Tescan VEGA II LMU scanning electron microscope with Oxford INCA Energy 350 energy dispersive x-ray analyzer to be $1.4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ of Er^{3+} and $9.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ Yb^{3+} .

The lifetime measurements were performed using an optical parametric oscillator based on a $\beta\text{-Ba}_2\text{B}_2\text{O}_4$ crystal and pumped by the third harmonic of a Q-switched Nd:YAG laser. The fluorescence from the sample was collected on the entrance slit of a monochromator and registered by an InGaAs photodiode coupled with a 500 MHz digital oscilloscope. It is well known that radiation trapping strongly influences the fluorescence dynamics of ytterbium ions because of the significant overlap of the absorption and emission bands. To prevent reabsorption the measurements of Yb^{3+} luminescence kinetics were performed using a fine powder of the crystals immersed in glycerin [11].

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

$$\eta = \tau(1/\tau - 1/\tau_0), \quad (2)$$

where τ is the ytterbium ${}^2\text{F}_{5/2}$ level lifetime in Er,Yb-codoped crystal; τ_0 is the ytterbium ${}^2\text{F}_{5/2}$ level lifetime in Yb single-doped crystal.

Luminescence spectra were registered at room temperature using an experimental setup that ensured synchronous detection of the optical signal. The excitation source was a semiconductor laser diode emitting at the wavelength near 976 nm. The luminescence was detected by an InGaAs photodetector. Its signal was processed by a lock-in amplifier. The output signal of the amplifier was digitized using an analog-to-digital converter and stored on a computer.

Setup for continuous-wave laser experiments

A plane–plane N_p -cut Er,Yb:YMBO crystal with a length of 2 mm was used as an active medium. The polished facets of the crystal were antireflection-coated for both pump (900–1100 nm) and laser (1500–1650 nm) wavelengths. The active element

was wrapped in indium foil for good thermal contact and mounted between two copper slabs with the hole in the center to permit passing of pump and laser beams. The temperature of an active element was kept at 20 °C. As a pump source a 976 nm fiber coupled laser diode ($\text{Ø}105 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.22$) was used. The plano–plano cavity with geometrical cavity length not exceeding 5 mm was adopted. The one-lens focusing system focused the pump beam into a 120- μm spot inside the laser crystal with the confocal parameter of 2.3 mm. Three output couplers with different transmittances at the laser wavelengths were used during laser experiments. The laser setup is shown in Figure 2.

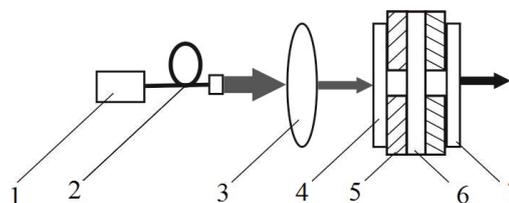


Figure 2 – The experimental setup of a continuous wave diode-pumped Er,Yb:YMBO laser: 1 – laser diode; 2 – fiber; 3 – focusing system; 4 – input mirror; 5 – copper heatsink; 6 – active element; 7 – output coupler

Results and discussion

Spectroscopy

The room-temperature polarized absorption cross-section spectra of the Er,Yb:YMBO crystal in the spectral range of 875–1025 nm (transitions of ${}^2\text{F}_{7/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{5/2}$ of Yb^{3+} ions and ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ of Er^{3+} ions) are shown in Figure 3. Two intensive absorption lines with peaks centered at 937 nm and 976 nm are observed. These peaks coincide with the emission wavelengths of commercial available InGaAs laser diodes. The maximum value of absorption cross-section was determined to be $1.5 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ at 976 nm with the bandwidth (FWHM) of about 3.5 nm for polarization $E//N_g$ axis. Thus, the pump beam polarization corresponded to the N_g axis of the crystal will be preferable for laser experiments.

Figure 4 shows the room-temperature polarized absorption spectra of Er,Yb:YMBO crystal in the 1425–1575 nm spectral range (transition ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ of erbium ions). A number of narrow lines are observed for three polarizations. The maximum value of absorption cross-section was determined to be $1.6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ at 1482 nm for polarization $E//N_m$ axis.

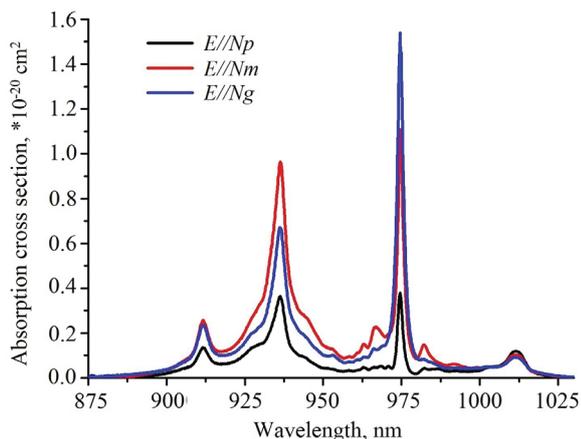


Figure 3 – Polarised absorption cross-section spectra of Er,Yb:YMBO crystal at near 1 µm

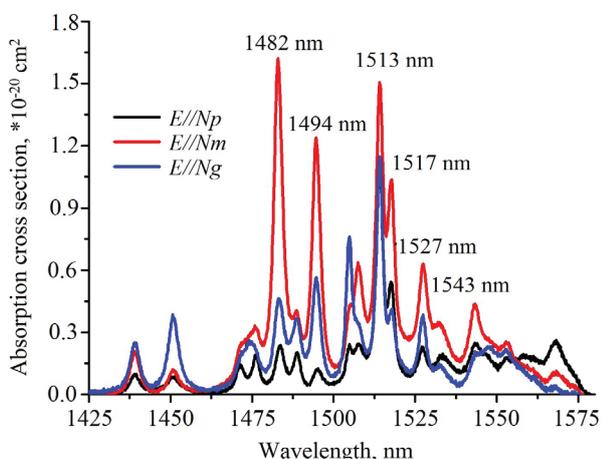


Figure 4 – Polarised absorption cross-section spectra of Er,Yb:YMBO crystal at near 1.5 µm

The measured decay curve of 1.5 µm emission was single exponential (Figure 5), and the luminescence decay time of the $^4I_{13/2}$ level was obtained to be about 390 ± 20 µs.

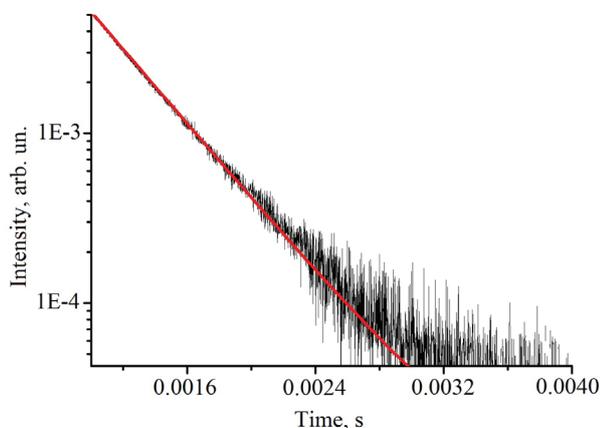


Figure 5 – Kinetics of luminescence decay of Er,Yb:YMBO in the region of about 1.5 µm

The dependence of obtained lifetimes of $^2F_{5/2}$ energy level on different weight content of Yb(1 at.):YMBO crystalline powders in glycerin suspension is presented in Figure 6. The fluorescence lifetime decreased with the decreasing of powder concentration in suspension. Starting from a certain powder content, the lifetime remained constant despite further dilution, which indicates negligible reabsorption influence. The $^2F_{5/2}$ energy level lifetime of ytterbium ions was measured to be 580 ± 10 µs.

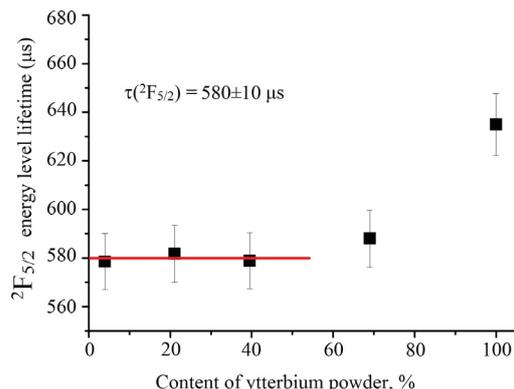


Figure 6 – The $^2F_{5/2}$ energy level lifetimes of Yb(1 at.):YMBO crystal

The $^2F_{5/2}$ energy level lifetime of Yb^{3+} was measured to be 95 ± 5 µs in Er(2 at.),Yb(11 at.):YMBO. By using formula (2) the energy transfer efficiency from ytterbium to erbium ions was calculated to be about 84 %. It should be mentioned that the energy transfer efficiency in Er,Yb:YMBO is similar to those in Er,Yb:YAB and Er,Yb:GdAB crystals [8, 9].

The polarised luminescence spectra of the Er,Yb:YMBO crystal (Figure 7) measured at room temperature are characterized by a structured bands in the spectral range 1450–1650 nm.

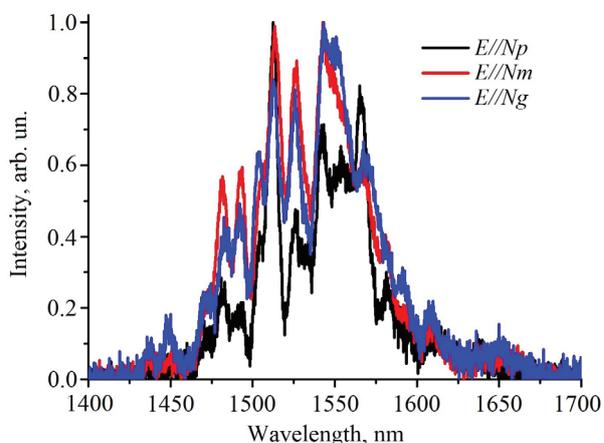


Figure 7 – Polarised luminescence spectrum of the Er,Yb:YMBO crystal

Laser characteristics of Er,Yb:YMBO crystal

Input-output characteristics of continuous-wave diode-pumped microchip Er,Yb:YMBO laser are plotted in Figure 8. The best laser performance was demonstrated with the 2% output coupler transmittance. The laser threshold was measured to be about 2 W of absorbed pump power. The maximum CW output power of 200 mW with the slope efficiency near 8% was obtained at 1570 nm with about 4.7 W of absorbed pump power. After further increasing of pump power, the rising of output laser power wasn't observed. It provides evidence for the influence of thermal load in the crystal on laser performance. To our mind, with the improvement of cavity parameters the output laser performance of the Er,Yb:YMgB₅O₁₀ crystal can be further enhanced.

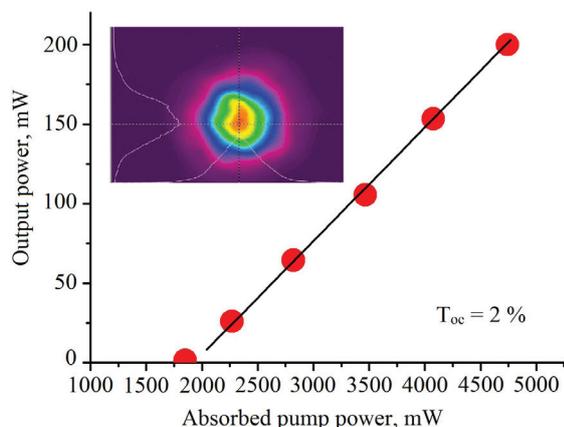


Figure 8 – The laser performance of Er,Yb:YMBO crystal in continuous-wave mode

The laser radiation was linearly polarized ($E//N_m$). The laser wavelength was measured to be 1570 nm. The spatial profile of the output beam measured at 4.5 W of absorbed pump power is presented in the inset in Figure 8.

Conclusion

In conclusion, a continuous-wave diode-pumped Er,Yb:YMBO laser with output power of 200 mW and slope efficiency of 8% at near 1570 nm was realized for the first time to our knowledge. Absorption and luminescence spectra, emission lifetimes, and efficiencies of energy transfer from Yb³⁺ to Er³⁺ ions were determined.

Acknowledgments

This research was supported by Russian Science Foundation grant (project No. 19-12-00235).

References

1. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping. *Appl. Phys. B.*, 2002, vol. 75, no. 1, pp. 41–46. DOI: 10.1007/s00340-002-0950-4
2. Taccheo S., Sorbello G., Laporta P., Karlsson G., Laurell F. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5 μm . *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 1, pp. 19–21. DOI: 10.1109/68.903207
3. Danger T., Huber G., Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E. Diode-pumped cw laser around 1.54 μm using Yb, Er-doped silico-boro-phosphat glass in Conference on Lasers and Electro-Optics, D. Scifres and A. Weiner, eds., Optical Society of America, 1998, paper CTuM71.
4. Burns P., Dawes J., Dekker P., Pipper J., Jiang H., Wang J. Optimization of Er,Yb:YCOB for cw laser operation. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1575–1582. DOI: 10.1109/JQE.2004.834935
5. Huang J., Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huang Y. High efficient 1.56 μm laser operation of Czochralski grown Er,Yb:Sr₃Y₂(BO₃)₄ crystal. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 22, pp. 17243–17248. DOI: 10.1364/OE.16.017243
6. Chen Y., Lin Y., Huang J., Gong X., Luo Z., Huang Y. Enhanced performances of diode-pumped sapphire Er³⁺:Yb³⁺:LuAl₃(BO₃)₄ sapphire microlaser at 1.5–1.6 μm . *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no.9, pp. 12401–12406. DOI: 10.1364/OE.23.012401
7. Gorbachenya K.N., Deineka R.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Shekhovtsov A.N., Kosmyna M.B., Kuleshov N.V. Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 μm Laser Crystals. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 14–22. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22
8. Kisel V.E., Gorbachenya K.N., Yasukevich A.S., Ivashko A.M., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Leonyuk N.I. Passively Q-switched microchip Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser. *Opt. Lett.*, 2012, vol. 37, no. 13, pp. 2745–2747. DOI: 10.1364/OL.37.002745
9. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser. *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 5, pp. 918–921. DOI: 10.1364/OL.41.000918
10. Mitina D.D., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Gorbachenya K.N., Deineka R.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V. Growth and characterization of RMgB₅O₁₀ (R=Y, La, Gd) crystals. *Inorg.Mater.*, 2020, vol. 56, no. 2 (accepted). DOI: 10.1134/S0002337X2002013X

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

DOI: 10.1364/OL.19.001343

12. Denker B., Galagan B., Ivleva L., Osiko V.,

Sverchkov S., Voronina I., Hellstrom J.E., Karlsson G., Laurell F. Luminescent and laser properties of Yb,Er activated $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ - a new crystal for eyesafe 1.5 micrometer lasers. *Appl. Phys. B.*, 2004, vol. 79, no. 5, pp. 577–581.

DOI: 10.1007/s00340-004-1605-4

УДК 681.2.082:531.45

Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта

И.З. Джилавдари¹, С. Мекид², Н.Н. Ризноокая¹

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

²Университет нефти и полезных ископаемых имени короля Фадха,
Дахран 31261, Саудовская Аравия

Поступила 12.10.2019

Принята к печати 29.11.2019

В настоящее время изучение трения качения является одним из основных направлений в исследовании закономерностей контактного взаимодействия твёрдых тел. О сложности решения проблем, существующих в этой области, свидетельствует практически необозримое количество публикаций, список которых постоянно растёт.

В данной работе внимание уделяется исследованиям моментов сопротивления качению при смещениях из положения равновесия тела в форме шарика, существенно меньших размеров пятна контакта. Цель представленной работы состояла в описании конструкции разработанного авторами одноконтактного маятникового прибора, в котором физический маятник, опираясь на плоскую поверхность исследуемого тела только одним шариком, совершает свободные малые качания со стабильной вертикальной плоскостью качаний, а также в описании специальной методики измерений с высокой чувствительностью и точностью сил сопротивления качению, в том числе, сил адгезии и упругих сил частотно-независимого внутреннего трения.

Оригинальность методики измерения сопротивления качению в данной работе состоит в использовании метода нелинейной аппроксимации зависимости амплитуды и периода качаний маятника от времени. Аппроксимация проводится на основании предложенных законов затухания амплитуды и изменения периода, которые отличаются от обычного экспоненциального закона. Предполагается, что данный подход позволяет провести оценку поверхностного натяжения твёрдого тела и оценку давления сил адгезии между поверхностями контактирующих тел, а также установить аналитический вид момента сопротивления качению. Проведены эксперименты для следующих пар контактирующих тел: сталь-сталь, сталь-стекло, сталь-кремний. Построены кривые зависимости момента сопротивления качению от амплитуды качаний маятника.

Разработанный одношариковый маятниковый прибор и предложенная методика измерений открывают новые широкие возможности для исследований механизмов и закономерностей сопротивления качению в условиях микро- и мезоперемещений катящегося тела из состояния покоя.

Ключевые слова: адгезия, поверхностное натяжение, сопротивление качению, физический маятник, сферическая опора.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

Адрес для переписки:

Н.Н. Ризноокая
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Address for correspondence:

N. Riznookaya
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Для цитирования:

И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая.
Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 308–321.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

For citation:

I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya.
[Device and Measuring Method the Moments of Rolling Resistance Forces on the Contact Spot].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 308–321 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

Device and Measuring Method the Moments of Rolling Resistance Forces on the Contact Spot

I. Gilavdary¹, S. Mekid², N. Riznookaya¹

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

²King Fahd University of Petroleum & Minerals, Mechanical Engineering Department,
Dhahran 31261, Saudi Arabia

Received 12.10.2019

Accepted for publication 29.11.2019

Abstract

Currently, the study of rolling friction is one of the main directions in the study of the laws of contact interaction of solids. The complexity of solving the problems existing in this area is evidenced by the practically vast number of publications, the list of which is constantly growing.

In this paper, attention is paid to studies of the moments of rolling resistance at displacements from the equilibrium position of a ball-shaped body that are substantially smaller than the size of the contact spot. The purpose of the present work is to describe the design of the single-contact pendulum device developed by the authors, in which the physical pendulum, resting on the flat surface of the body under study with only one ball, makes free small stable swings in a vertical plane, as well as in the description of a special measurement technique with high sensitivity and accuracy rolling resistance forces, including adhesion forces and frequency-independent forces of elastic deformations. It is assumed that the adhesion forces can exhibit both dissipative properties and elastic properties, while elastic forces are independent of the strain rate.

The originality of the method of measuring rolling resistance in this paper consists in using the method of nonlinear approximation of the dependence of the amplitude and period of swing of the pendulum on time. The approximation is carried out on the basis of the proposed laws of amplitude decay and period variation, which differ from the usual exponential law.

It is assumed that this approach allows one to evaluate the surface tension of a solid and evaluate the pressure of adhesion forces between the surfaces of the contacting bodies, as well as to establish an analytical form of the moment of rolling resistance. The curves of the dependence of the rolling resistance moment on the swing amplitude of the pendulum are constructed. Experiments were performed for the following pairs of contacting bodies: steel-steel, steel-glass, steel-electrotechnical silicon. It was assumed that the pressure at the contact spot did not exceed the elastic limit.

The developed single-ball pendulum device and the proposed measurement procedure open up new wide possibilities for studying the laws of mechanisms of rolling resistance under conditions of micro- and mesoscale displacements of a rolling body from a state of rest.

Keywords: adhesion, surface tension, rolling resistance, physical pendulum, spherical support.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

Адрес для переписки:

Н.Н.Ризноокая
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Address for correspondence:

N.Riznookaya
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Для цитирования:

И.З. Джилавдари, С. Мекид, Н.Н. Ризноокая.
Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления
качению на пятне контакта.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 308–321.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

For citation:

I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya.
[Device and Measuring Method the Moments of Rolling Resistance
Forces on the Contact Spot].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 308–321 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-308-321

Введение

Изучение трения качения проводится, как правило, в условиях, когда скорость качения постоянна. В этой области накоплен большой опыт и сформулированы основные закономерности, описывающие зависимость момента сопротивления качению от различных влияющих факторов, величины нагрузки и условий движения. О сложности решения проблем, существующих в этой области, свидетельствует практически необозримое количество публикаций, список которых постоянно растет [см., например, работы, появившиеся в последнее время, 1–4].

Однако, при решении проблем достижения высокой точности управления движением и позиционирования в системах автоматического управления, требуется знание закономерностей сопротивления качению в самом начале движения из состояния покоя и в области реверса. Это привело к необходимости изучения закономерностей трения качения при малых нагрузках, малых скоростях и малых смещениях катящегося тела. Было установлено, что в этих условиях основные механизмы трения качения связаны с упругостью контактирующих тел, проскальзыванием и внутренним гистерезисным трением, а также адгезией [5, 6]. Перемещения в паре трения, при которых трение качения возникает из состояния покоя и имеет неустановившийся характер, получили специальное название – «*pre-rolling*». Здесь законы зависимости моментов сопротивления качению от перемещений имеют специфический нелинейный характер, которые до сих пор остаются недостаточно изученными [3, 7–10].

Кроме того, развитие микротехники и нанотехники привело к необходимости в исследовании сил адгезии, как причины взаимного прилипания отдельных элементов микроэлектромеханических систем, нарушающих их работу [11]. Фактор прилипания, обусловленный силами адгезии, должен также учитываться в технике при использовании микро- и наноманипуляторов [12, 13]. Адгезию можно изучать как один из механизмов трения качения.

До сих пор изучение сил адгезии проводилось, в основном, или такими «тонкими» физическими приборами как атомные силовые микроскопы (АСМ) [14], или техническими приборами, в которых используется прямой отрыв различных тел, приклеенных к подлож-

ке, методы склерометрии, царапанья, расслоения^{1,2} [15].

Однако АСМ позволяет проводить измерения лишь в пределах нескольких нанометров или микрометров. В свою очередь, «технические» приборы не позволяют проводить измерения с высокой чувствительностью и точностью.

Несмотря на практическую важность указанных выше проблем, до сих пор не были разработаны «эмпирические процедуры для измерения и представления законов трения» [4] с высокой чувствительностью и точностью.

В данной работе представлены результаты разработки «эмпирической процедуры для измерения и представления закона трения качения» в том частном случае, когда смещение тела качения имеет размеры, которые существенно меньше радиуса пятна контакта. Эту область качения мы назовем «*deep pre-rolling*», или «*DPR*». Как будет показано, в этой области адгезия тел на пятне контакта может быть измерена с высокой чувствительностью и точностью в пределах нескольких микрометров и больше.

Цель работы состояла в описании конструкции разработанного авторами одноконтактного маятникового прибора, в котором физический маятник, опираясь на плоскую поверхность исследуемого тела только одним шариком, совершает свободные малые качания со стабильной плоскостью качаний, а также в описании специальной методики выполнения измерений сил сопротивления качению, в том числе и сил адгезии, с высокой чувствительностью и точностью в области *DPR*.

Маятниковые приборы для исследования сил адгезии

Приборы, в которых используется метод свободных качаний физического маятника, опирающегося через тело качения (шарики, ролики, ребро призмы (или ножа)), на плоскую площадку (или подушку), давно используются для измерения

¹ГОСТ 15140-79. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. – Введён: 01.01.79. – М.: Стандартинформ, 2009 – 9с.

²ГОСТ 28574-2014. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий – Введён: 01.01.2015 – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.

твёрдости и прочности материалов и изделий [16, 17, 21]. Твёрдость и прочность площадки-образца в этих приборах связывают с декрементом затухания амплитуды качаний маятника. Поскольку способы расчёта этого параметра в разных приборах разные, то с каждым из них связывают свое значение и твёрдости, и прочности. В результате, для маятниковых измерений появились такие понятия как «твёрдость по Герберту» [17–20], *damping hardness*, стеклянное число³ и др.

С точки зрения возможности расчёта деформаций тел при их упругом контакте, наиболее простым является контакт шарика и плоской поверхности. Эта часть теории упругости является наиболее разработанной [6]. Рядом исследователей уже давно были предприняты попытки построения маятникового прибора на одном шарике. Однако, при работе с таким (одноконтактным) маятником исследователи столкнулись с проблемой неустойчивости плоскости его качаний, поскольку маятник на одном шарике имеет три вращательных степени свободы, что приводит к нестабильности плоскости качаний и значительно усложняет проведение исследований.

По-видимому, Дж. А. Томлинсон был первым, кто использовал двухконтактный физический маятник для систематических исследований молекулярной природы трения качения при малых амплитудах качаний. В его опытах (1929 г.) маятник в форме диска, насаженного на цилиндрическую ось, опирался на два тела качения (два цилиндра, или два полуцилиндра, или два шарика). Коэффициент трения качения находили путём вычисления декремента затухания амплитуды качаний диска в предположении, что этот декремент остается постоянным [22]. В своей статье, среди прочих, Томлинсон пришел к выводу о том, что коэффициент трения качения практически не зависит от скорости.

Ранее авторами данной работы был разработан двухконтактный маятниковый прибор, в котором физический маятник совершал свободные затухающие качания с амплитудой, существенно меньшей угла упругого контакта, опираясь двумя одинаковыми шариками на плоскую исследуемую поверхность. Центр масс маятника находился на пятне контактов шариков [23, 24].

³ГОСТ 5233-89. Материалы лакокрасочные. Метод определения твердости покрытий по маятниковому прибору. – Введён: 01.01.1990. – М.: ИПК издательство стандартов, 2003. – 5 с.

Было предположено, что при нагрузках, не выходящих за область упругих деформаций, и малых скоростях качения, шарики совершают перемещение в условиях, близким к условиям чистого качения. В этом случае основными механизмами сопротивления качению являются силы адгезии и силы частотно независимого внутреннего трения, возникающего при деформациях контактирующих тел. Была построена феноменологическая теория сопротивления качению в режиме *DPR*, и было показано, что с помощью этого прибора можно изучать закономерности сопротивления качению в нано- и микромасштабе с рекордно высокими чувствительностью и точностью.

Однако, двухконтактный маятник имеет очевидный недостаток: его можно применять только при наличии двух одинаковых исследуемых образцов, подкладываемых под каждый шарик, или одного образца с относительно большой однородной поверхностью. Это существенно снижает номенклатуру испытываемых материалов. Кроме того, здесь существует проблема тождественности, как самих шариков, так и условий их фиксации.

Феноменологическая теория сопротивления качению в режиме *DPR*

Эта теория построена в предположении, что силы адгезии можно представить, как некоторые силовые связи (упругие пружины), которые соединяют контактирующие тела. При качаниях маятника часть этих связей разрывается, и в этом случае какая-то доля энергии маятника уходит на совершение работы по отрыву поверхности шарика от исследуемой поверхности. Так же, часть энергии маятника должна уходить на совершение работы против сил внутреннего трения при деформации контактирующих тел, и эти силы являются частотно независимыми.

Исходя из этих предположений, «диссипативный» момент трения как функция угла φ отклонения маятника может быть записан в виде [24]:

$$M_{fr} = -mgR \left(c + b\varphi^p \right) \operatorname{sign} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right), \quad (1)$$

где m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; R – радиус шарика; c, b, p – параметры аппроксимации, определяемые из эксперимента.

Здесь коэффициент c «отвечает» за адгезионную составляющую трения, и вторая часть в правой части формулы (1) «отвечает» за частотно-независимое внутреннее трение при деформации контактирующих тел.

Пользуясь формулой (1), можно вычислить значение удельной поверхностной энергии в зоне контакта, как отношение работы $A_t(\varphi) = mgRc\varphi$, совершаемой силами адгезии при отрыве поверхности шарика от поверхности пятна контакта площадью $S \approx 2aR\varphi$ в процессе его поворота на малый угол φ при его откате от положения равновесия, к величине площади этого контакта S :

$$\sigma = \frac{A_t}{S} = \frac{mgc}{2a}. \quad (2)$$

Параметр σ по своему физическому смыслу и размерности совпадает с аналогичным параметром, используемым в [3] (где он обозначен через λ), который автор называет поверхностной энергией или поверхностным натяжением.

Явление резкого уменьшения периода отклонений маятника с уменьшением амплитуды мы связали с действием сил адгезионных связей, но с теми связями, которые «не рвутся» при качаниях маятника. Зависимость момента этих сил от угла поворота шарика можно записать в виде [24]:

$$M_{el}(\varphi) \approx 2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R}{a} \varphi \right) \cdot \text{sign}(\varphi), \quad (3)$$

где a – радиус пятна контакта; γ, n – параметры аппроксимации, определяемые из эксперимента.

$$\left\{ I + m \left[(l_c - R)^2 + 4Rl_c \sin^2 \left(\frac{r}{2(r-R)} \varphi \right) \right] \right\} \ddot{\varphi} + ml_c \frac{R \cdot r}{r-R} \sin \left(\frac{r}{r-R} \varphi \right) \cdot (\dot{\varphi})^2 + mg \left[l_c \sin \varphi + R \sin \left(\frac{R}{r-R} \varphi \right) \right] = M, \quad (4)$$

где I – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс параллельно оси вращения; l_c – расстояние от центра шара до центра масс маятника; M – проекция момента силы трения качения на ось вращения.

Проекция ускорения центра масс маятника на горизонтальную касательную к опоре в точке контакта, которая определяет силу трения, удерживающую маятника от скольжения, имеет вид:

$$a_c = \left[l_c \cos \left(\frac{r}{r-R} \varphi \right) - R \right] \ddot{\varphi} - \left[l_c \sin \left(\frac{r}{r-R} \varphi \right) \right] (\dot{\varphi})^2. \quad (5)$$

По нашему мнению, параметр γ характеризует упругое давление сил адгезии, действующее между поверхностью шарика и исследуемой поверхностью. В [3] автор в случае действия сил Ван-дер-Ваальса аналогичный параметр (там он обозначен через σ) называет напряжением Ван-дер-Ваальса.

Получим дифференциальное уравнение качаний маятника с опорой в виде шарика. С целью достижения более общего результата, решим задачу о качаниях маятника с опорой в виде шарика или цилиндра радиусом R , совершающего плоское движение по вогнутой сферической или цилиндрической поверхности радиусом r (рисунок 1).

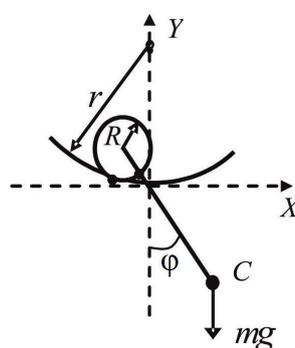


Рисунок 1 – Физический маятник, опирающийся шариком на вогнутое основание

Figure 1 – A physical pendulum supported by a ball on a concave base

При отсутствии проскальзывания и деформаций (точечный контакт) в области контакта уравнение качаний маятника с опорой, представленной на рисунке 1, имеет вид:

Случай опоры маятника в виде шара, опирающегося на плоскую поверхность, можно получить из уравнений (4) и (5), устремив радиус r к бесконечности. Тогда уравнения (4) и (5) примут следующий вид:

$$\left\{ I + m \left[(l_c - R)^2 + 4Rl_c \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right] \right\} \ddot{\varphi} + \quad (6)$$

$$+ ml_c R \sin(\varphi) \cdot (\dot{\varphi})^2 + mgl_c \sin \varphi = M,$$

$$a_c = (l_c \cos \varphi - R) \ddot{\varphi} - l_c \sin \varphi (\dot{\varphi})^2. \quad (7)$$

При очень малых значениях угла φ ($\varphi \ll 1$) и угловой скорости $\dot{\varphi} \approx 0$ ($\sin \varphi \approx \varphi$, $\cos \varphi \approx 1$, $\dot{\varphi}^2 \approx 0$), последние два уравнения запишутся в виде:

$$\left[I + m(l_c - R)^2 \right] \ddot{\varphi} + mg l_c \varphi = M; \quad (8)$$

$$a_c = (l_c - R) \ddot{\varphi}. \quad (9)$$

Если центр масс маятника находится на пятне контакта, т. е. выполняется условие $l_c = R$, из последних двух уравнений имеем:

$$I \ddot{\varphi} + mgR\varphi = M; \quad (10)$$

$$a_c = 0. \quad (11)$$

Первое из этих двух уравнений по своему виду совпадает с уравнением малых качаний математического маятника, подвешенного на нити длиной R . Из последнего равенства следует, что ускорение центра масс маятника в нижней точке равно нулю, поэтому маятник не будет испытывать действия силы трения со стороны опоры и, как следствие, он не будет испытывать влияния горизонтальных составляющих вибраций основания.

Полный момент сил сопротивления качению может быть записан в виде:

$$M(\varphi) = M_{fr}(\varphi) + M_{el}(\varphi). \quad (12)$$

Тогда уравнение (10) имеет вид:

$$I \ddot{\varphi} + mgR\varphi = M_{fr}(\varphi) + M_{el}(\varphi). \quad (13)$$

Уравнение (13) будем решать в первом приближении асимптотической теории нелинейных колебаний. В этом приближении зависимость амплитуды от времени $\alpha(t)$ определяется диссипативным моментом, и зависимость периода от амплитуды $T(\alpha)$ – упругим моментом. Зависимость амплитуды от времени можно найти, решая уравнение (13) в виде:

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mgR\varphi = -mgR \left(c + b\varphi^p \right) \text{sign} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right). \quad (14)$$

Решение уравнения (14) в первом приближении асимптотической теории нелинейных колебаний даёт зависимость амплитуды α качаний маятника от времени t в неявном виде [29]:

$$t(\alpha) = -\frac{T}{4} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\varphi}{\frac{1}{b\varphi^p + c}}, \quad (15)$$

где T – среднее значение периода качаний маятника.

Используя уравнение (15) в качестве уравнения регрессии для аппроксимации экспериментальных кривых затухания амплитуд качаний, можно определить численное значение параметров c , b и p .

Зависимость периода от амплитуды можно найти, решая уравнение (13) в виде:

$$I \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mgR\varphi = 2\gamma a^2 R |\varphi|^{n+1} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{R}{a} \varphi \right) \cdot \text{sign}(\varphi). \quad (16)$$

Решение уравнения (16) в первом приближении асимптотической теории нелинейных колебаний имеет вид (формула (28) в [24]):

$$T(\alpha) = T_0 \left[1 - \sqrt{\pi} \gamma \frac{a^2 \alpha^n \Gamma\left(\frac{n}{2} + \frac{3}{2}\right)}{mg \Gamma\left(\frac{n}{2} + 2\right)} \left(1 - 0.55 \frac{R\alpha}{a} \right) \right]^{-1}. \quad (17)$$

Используя уравнение вида (17) как уравнение регрессии экспериментальной зависимости $T(\alpha)$, можно найти численные значения параметров T_0 , γ и n . Решение в виде (17) является наиболее устойчивым по отношению к выбору начальных значений этих параметров при вычислениях в процессе нелинейной аппроксимации. Из уравнений (17) и (16) видно, что $T_0 = T(0) = 2\pi \sqrt{mgR/I}$. В принципе, последняя формула позволяет уменьшить количество параметров аппроксимации до двух. Однако, чтобы провести такое вычисление, требуется знать значение момента инерции I с высокой точностью.

Зависимость $M(\varphi)$ при известной зависимости $\varphi(t)$ позволяет построить феноменологическую теорию сопротивления качению сил адгезии в режиме *DPR*. В частности, зависимость $M_{el}(\varphi)$ позволяет построить скелетную кривую и зависимость $M_{fr}(\varphi)$ позволяет построить петлю гистерезиса. Примеры таких кривых приведены ниже.

Маятниковый прибор с опорой на один шарик (конструкция и методика измерений)

Как уже отмечалось выше, при использовании маятникового прибора с опорой на один шарик возникает проблема неустойчивости

вертикальной плоскости качаний маятника. Эффект неустойчивости усиливается, когда центр масс маятника приближается к точке опоры, и трение невелико. Если маятник установлен одним опорным шариком на твёрдую плоскую поверхность, он имеет возможность совершать качания вокруг двух горизонтальных осей и совершать вращение вокруг вертикальной оси.

В наших экспериментах было установлено, что в режиме *DPR* при осторожном запуске качаний вращение маятника вокруг вертикальной оси практически не возникает или быстро прекращается; это означает, что трение вращения здесь максимально. Было также замечено, что, если маятник имеет вытянутую форму, при которой моменты инерции главных горизонтальных центральных осей инерции значительно отличаются между собой (рисунок 2), то качания с малым периодом вокруг длинной оси (ось U с минимальным моментом инерции) затухают раньше, чем качания с большим периодом вокруг короткой оси (ось V с максимальным моментом инерции). Отсюда следует, что, если в маятнике с опорой на один шарик записывать длительно периодические качания после того, как успокоятся коротко периодические качания, то плоскость качаний будет стабильной.

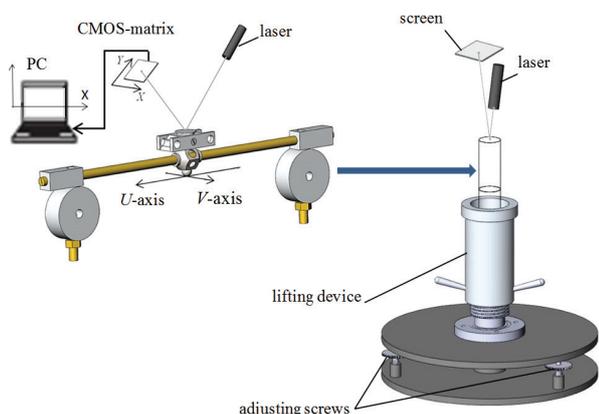


Рисунок 2 – Маятник с системой записи траектории движения луча и балансировочное устройство

Figure 2 – A pendulum with a system for recording the beam trajectory, a balancing device

На рисунке 2 показан маятник с опорой на один шарик, специально изготовленный для проведения измерений. К верхней поверхности маятника прикреплено тонкое плоское зеркало. В этом маятнике отношение момен-

тов инерции I_v/I_u было около 25, что на опыте дало отношение периодов качаний T_v/T_u , равным около 5. Диаметр шарика равнялся 12,1 мм. Масса маятника равнялась 0,406 кг. Центр масс маятника находился вблизи пятна контакта, что достигалось путём его тщательной балансировки (см. Приложение).

Для измерения амплитуды и времени колебаний маятника использовалась оптическая система записи его качаний, состоящая из полупроводникового лазера, фокусирующего устройства (на рисунке 2 оно не показано), зеркала, установленного на маятнике, КМОП-матрицы и компьютера, записывающего сигналы с матрицы. Такая система позволяет записать траекторию смещения луча, отражённого от маятника, в координатах YX КМОП-матрицы (см. рисунок 3).

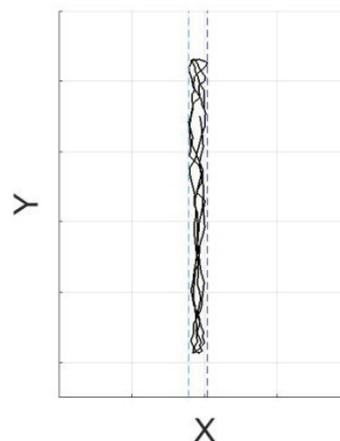


Рисунок 3 – Запись траектории пятна лазерного луча на матрице в течение 2-х первых периодов качаний

Figure 3 – Recording trajectory spot of the laser beam on the matrix within the first 2 swing periods

Если маятник идеально сбалансирован, оптико-электронная система идеально настроена и не имеет шумов, и влияние вибраций основания отсутствует, то короткопериодические поперечные качания маятника не должны возбуждаться и запись на рисунке 3 должна представлять собой вертикальную линию. Однако, в реальности всё же наблюдаются фигуры, подобные фигурам Лиссажу.

Изменение координаты Y со временем t является записью амплитуды колебаний маятника вокруг короткой оси. Пример записи $Y(t)$ маятника показан на рисунке 4.

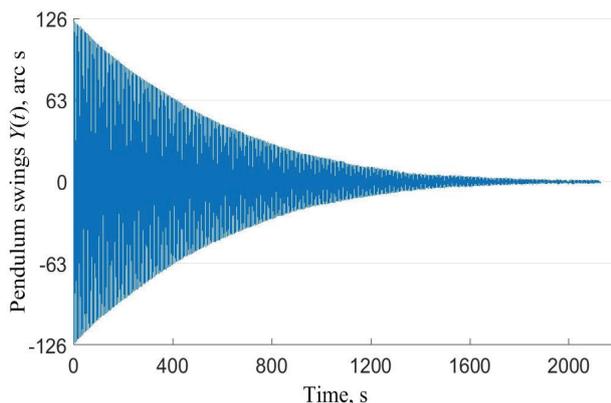


Рисунок 4 – Запись амплитуды длинно периодических качаний маятника $Y(t)$ с опорой на один шарик

Figure 4 – Recording long periodic amplitude pendulum swing $Y(t)$ with a support on one ball

Результаты измерений и расчётов

В экспериментах в качестве опоры маятника использовался шарик радиусом $R = 6,05$ мм, выполненный из стали ШХ15. В качестве материалов, на которые опирался маятник, были выбраны полированные образцы монокристаллического кремния (шероховатость $Ra = 0,4$ нм, модуль упругости $E_{si} = 1,31 \cdot 10^{11}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu_{si} \approx 0,266$), стали ШХ15 ($Ra = 63$ нм, $E_{st} = 2,11 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu_{st} \approx 0,28$) и оптического стекла К8 ($Rz = 40$ нм, $E_g = 0,82 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\nu_g \approx 0,206$).

Параметры области контакта шарика и испытываемых поверхностей, рассчитанные по формулам Герца, приведены в таблице 1.

Начальная амплитуда колебаний маятника α_0 была выбрана, равной, примерно, 124 угл. с, конечная амплитуда составляла, примерно, 2 угл. с, так что максимальное смещение шарика $r_{\max} \approx 3,63$ мкм, минимальное смещение шарика $r_{\min} \approx 0,06$ мкм. Видно, что угловые и линейные смещения шарика находились в зоне *DPR*. Результаты измерений зависимостей амплитуды α от времени t и периода T от амплитуды α , полученные для пар трения путем усреднения результатов серии из трёх проведённых подряд измерений для каждой пары образцов, показаны на рисунке 5.

Результаты расчёта параметров аппроксимации (параметров трения) зависимости амплитуды от времени и периода от амплитуды представлены

в таблице 2. Погрешности аппроксимации (ПА) экспериментальных зависимостей аналитически, приведённые в таблице 2, были рассчитаны по формуле ПА(x):

$$ПА(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \left| \frac{x_i - x(t_i)}{x_i} \right|, \quad (18)$$

где x_i – измеренные значения; $x(t_i)$ – аналитические значения, вычисленные в соответствии с формулой (15) для амплитуды и с формулой (17) для периода.

Отметим также, что значения параметра σ согласуются по порядку величины с значениями «адгезионной энергии» w_{t-s} ($w_{t-s} \sim 10^{-3}$ Дж/м²), полученными с помощью АСМ [14], а также с помощью контактного адгезиометра [25, 26].

Таблица 1 / Table 1

Параметры области контакта шарика и испытываемых поверхностей, рассчитанные по формулам Герца

The parameters of the contact area of the ball and the test surfaces, calculated according to the Hertz formulas

Материал шарика/материал опоры	Радиус пятна контакта, мкм	Глубина внедрения шарика в опору, мкм	Контактный угол, угл. мин.
Ball Material/Support Material	Contact spot radius, μm	Depth of ball penetration into the support, μm	Contact angle, arc minute
Сталь/сталь Steel/steel	54	0,5	31
Сталь/кремний Steel/silicon	59	0,6	34
Сталь/стекло К8 Steel/glass	66	0,7	38

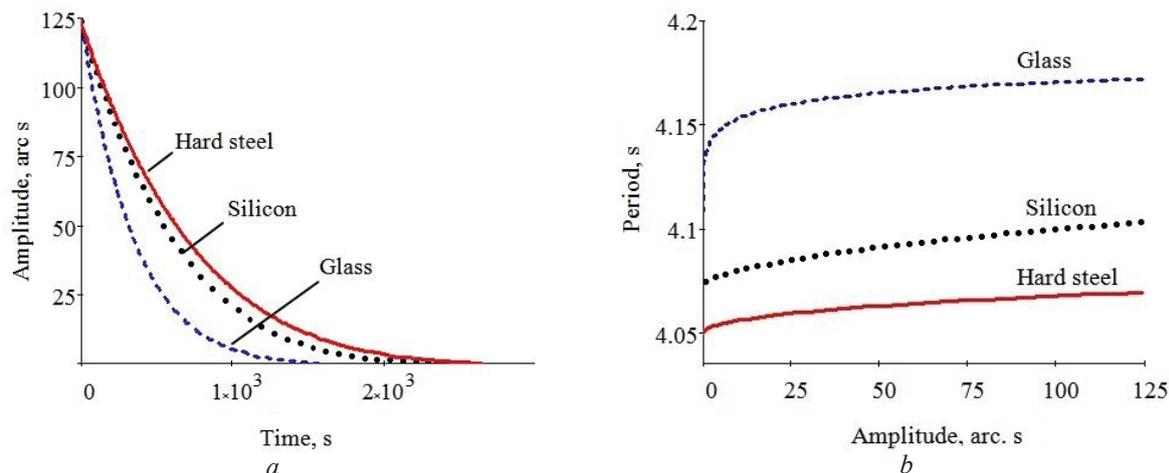


Рисунок 5 – Вид кривых аппроксимации зависимости амплитуды качаний маятника от времени (a) согласно формуле (15) и периода качаний маятника от амплитуды (b) согласно (17)

Figure 5 – View of the approximation curves of the dependence of the swing amplitude of the pendulum on time (a) (15) and the swing period of the pendulum on amplitude (b) (17)

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета параметров аппроксимации

Results of calculation of approximation parameters

Параметр трения, (начальная амплитуда 124 угл. с) Friction parameter (initial amplitude 124 ars. sec)	Контактная пара шарик/материал опоры Contact pair ball/support material		
	стекло К8 glass	кремний silicon	сталь ШХ15 steel
$p, 10^{-4}$	37.33	7.06	7.96
b	0.944	0.815	0.847
$c, 10^{-9}$	10.51	3.84	6.61
$\sigma, 10^{-3}$ Дж/м ²	28.9	13.2	27.3
$4A_t, 10^{-15}$ Дж	15.7	45.72	9.86
$4A, 10^{-15}$ Дж	98.6	75.2	64.3
ПА(α)	0.008	0.026	0.035
n	0.092	0.552	0.461
T_0, c	4.071	4.072	4.049
$\gamma, 10^6$ Н/м ²	28.97	290.69	95.46
ПА(T)	0.002	0.002	0.004

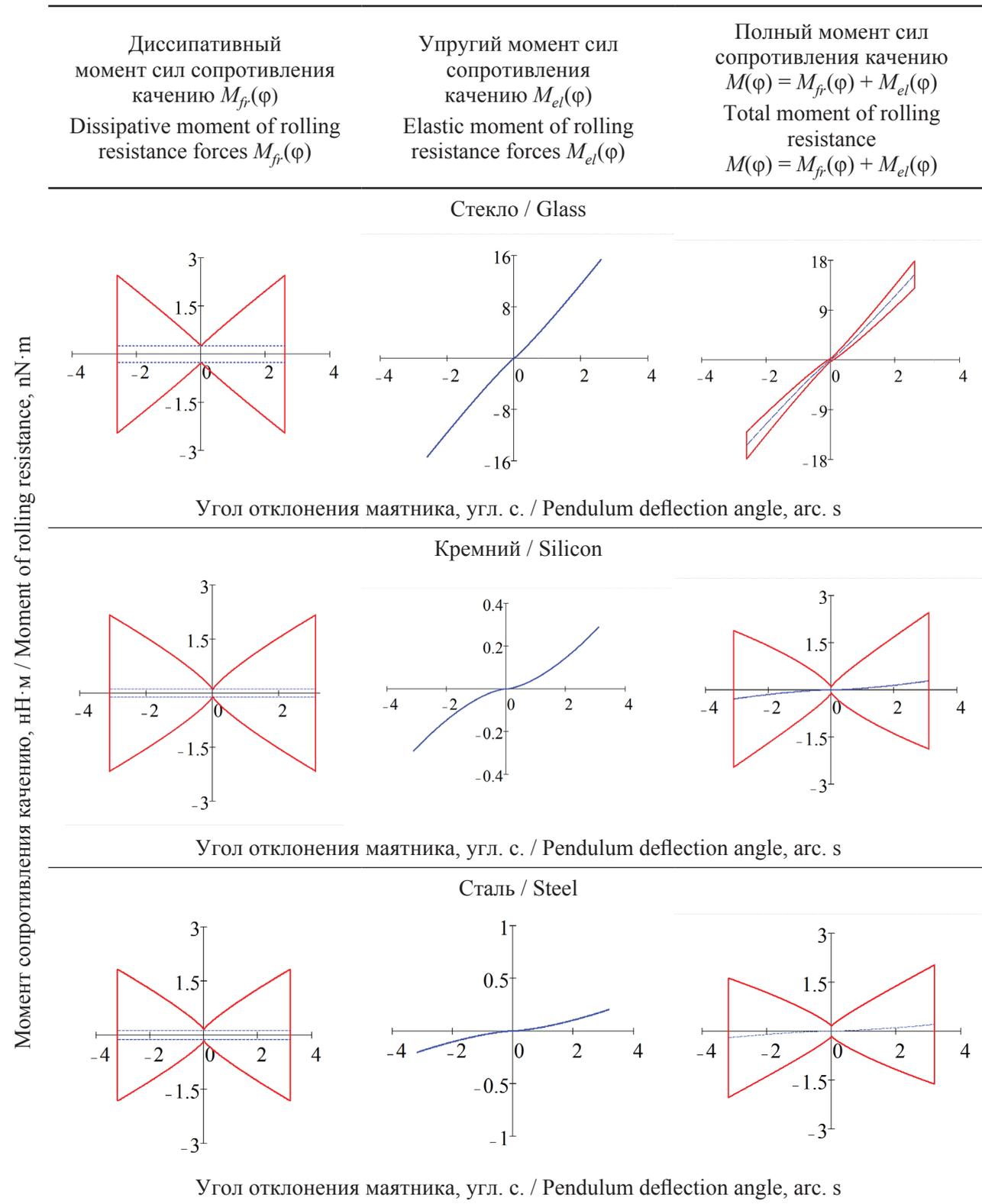
В таблице 3 представлены графики зависимости моментов сил сопротивления качению от угла отклонения маятника в пределах одного цикла качания с амплитудой 3.1 угл. с, построенные по формулам (1), (3) и (12) с учётом значений параметров, полученных путём аппроксимации экспериментальных данных для всех трёх испытываемых материалов. В ней также показаны

результаты расчёта работы диссипативных сил за один полный цикл качаний 4A (полная площадь фигур в левой колонке таблицы 3) и работы сил адгезии на отрыв за один полный цикл качаний 4At (площадь прямоугольника, выделенного пунктирными линиями, см. фигуры в левой колонке таблицы 3), численные данные приведены в таблице 2.

Таблица 3 / Table 3

Графики зависимости моментов сопротивления качению от угла отклонения маятника, построенные по формулам (1), (3) и (12), для начальной амплитуды $\alpha = 3.1$ угл. с

Graphs of the dependence of the rolling resistance moments on the angle of deviation of the pendulum, constructed according- to formulas (1), (3) and (12), for the initial amplitude $\alpha = 3.1$ arc.s



Из данной таблицы наглядно видно, что, в общем случае, момент зависимости сил сопротивления качению является нелинейным, как при действии сил упругости, так и действии сил адгезии, и, кроме того, существует момент трения покоя, определяемый именно адгезионными свойствами поверхностей контактирующих тел.

Заключение

При качении опорного шарика в зоне перемещений, размеры которой существенно меньше размеров пятна контакта – в зоне «*deep-pre-rolling*» (*DPR*), трение качения определяется диссипативным и упругим моментами сил. Диссипативная составляющая включает работу сил адгезии на отрыв и работу против сил частотно независимого внутреннего трения. Упругая составляющая момента сопротивления качению определяется давлением сил адгезии между поверхностями контактирующих тел.

В зоне *DPR* трение качения уменьшается с уменьшением скорости качаний. Эта особенность трения позволяет построить маятниковый прибор с опорой на один шарик со стабильной вертикальной плоскостью качаний. В этом приборе маятник должен иметь форму, при которой горизонтальные моменты инерции существенно отличаются между собой.

В зоне *DPR* существует эффект резкого уменьшения периода качаний маятника при уменьшении амплитуды качаний. При этом момент трения качения также уменьшается и стремится к своему минимальному конечному значению, определяемому работой сил адгезии на отрыв. При исследовании моментов сопротивления качению в зоне *DPR* необходимо проводить измерения зависимости амплитуды качаний от времени качаний и периода качаний маятника от амплитуды.

Разработанный макет прибора и методика измерений впервые позволяют построить простой прибор для прямых измерений с высокой чувствительностью и точностью плотности поверхностной энергии сил адгезии (или поверхностного натяжения) твёрдого тела, параметров внутреннего частотно-независимого трения и давления сил адгезии.

Приложение

Балансировку маятника проводят в два этапа.

1. Балансировка положения центра масс маятника в горизонтальной плоскости:

1.1. Две стеклянные плоскопараллельные призмы (например, по ГОСТ 1121-54) устанавливают одну на другую, так что их плоскости располагаются параллельно кромке цилиндра подъёмного устройства и, используя пузырьковый уровень, с помощью регулировочных винтов площадки, добиваются их горизонтального положения. Верхняя призма должна располагаться на уровне зеркала самого маятника.

1.2. Луч лазера направляют на поверхность призмы, обладающей отражательной способностью. На экране отмечают положение луча лазера, отражённого от этой поверхности (положение А).

1.3. Снимают верхнюю призму.

1.4. Цилиндр подъёмного устройства перемещают вверх на уровень верхней призмы. При этом кромка подъёмного устройства должна быть выставлена горизонтально.

1.5. Кладут маятник на кромку цилиндра подъёмного устройства, так, чтобы шарик маятника не касался нижней призмы.

1.6. Опускают подъёмное устройство вместе с маятником вниз до момента касания шариком маятника нижней призмы.

1.7. Фиксируют положение луча лазера, отражённого от зеркала на экране (положение Б).

1.8. Цилиндр подъёмного устройства перемещают вверх на уровень верхней призмы. Подкручивают балансировочные винты маятника.

1.9. Повторяют пп. 1.6–1.8 до тех пор, пока положение Б луча лазера не совпадет с положением А.

2. Балансировка положения центра масс маятника в вертикальном направлении.

2.1. Устанавливают маятник на плоскопараллельный брусок, выполненный из твёрдого материала, и перемещают этот брусок на горизонтальной поверхности с небольшим ускорением в направлении, перпендикулярном длинной оси маятника.

2.2. Наблюдают направление отклонения маятника в начале движения.

2.3. Подкручивая вертикальные балансировочные грузы маятника, добиваются того, чтобы в начале перемещения бруска маятник сохранял состояние покоя.

Результатом балансировки является совпадение положения центра масс маятника с пятном контакта.

Список использованных источников

1. Cross, R. Coulomb's Law for rolling friction / R. Cross // *Amer. J. Phys.* – 2016. – Vol. 84, no. 3. – P. 221–230. DOI: 10.1119/1.4938149
2. Cherepanov, G.P. The laws of rolling / G.P. Cherepanov // *Physical Mesomechanics.* – 2019. – Vol. 22, no. 3. – P. 242–254. DOI: 10.1134/S1029959919030093
3. Popov, V.L. Contact mechanics and friction: Physical Principles and Applications / V.L. Popov // Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 2017. – P. 231–253. DOI: 10.1007/978-3-662-53081-8
4. Popov, V.L. What does friction really depend on? Robust governing parameters in contact mechanics and friction / V.L. Popov // *Physical Mesomechanics.* – 2016. – Vol. 19, no. 2. – P. 115–122. DOI: 10.1134/S1029959916020016
5. Bowden, F.P. The friction and lubrication of solids / F.P. Bowden, D. Tabor // New York: Oxford University Press, 1950. – 372 p.
6. Johnson, K.L. Contact mechanics / K.L. Johnson // Cambridge university press, 1987. – 452 p. DOI: 10.1017/CBO9781139171731
7. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S. Mekid // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2004. – Vol. 218, no. 4. – P. 305–312. DOI: 10.1243/1350650041762686
8. Tan, X. Measurement and modeling of dynamic rolling friction in linear microball bearings / X. Tan, A. Modafe, R. Ghodssi // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.* – 2006. – Vol. 128. – P. 891–898. DOI: 10.1115/1.2362786
9. Amthor, A. High precision position control using and adaptive friction compensation approach / A. Amthor, S. Zschaeck, C. Ament // *IEEE Transactions on automatic control.* – 2010. – Vol. 55, no. 1. – P. 274–278. DOI: 10.1109/TAC.2009.2036307
10. Benditkis, R. Comment on rolling resistance / R. Benditkis, D.S. Neculescu // *Technical briefs in J. Tribology.* – 1994. – Vol. 116, no. 3. – P. 658–659. DOI: 10.1115/1.2928898
11. Van Spengen, W. Merlijn. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective / W. Merlijn van Spengen // *Microelectronics Reliability.* – Vol. 43, no. 7. – 2003. – P. 1049–1060. DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00119-7
12. Mekid, S. Dedicated instruments for nano-engineering education: Integrated nano-manipulation and micro-nanomachining / S. Mekid // *International Journal of Mechanical Engineering Education.* – 2019. – P. 0306419019846591. DOI: 10.1177/0306419019846591
13. Mekid, S. Engineering manipulation at nano-scale: further functional specifications / S. Mekid, S. Bashmal // *Journal of Engineering, Design and Technology.* – 2019. – Vol. 17, no. 3. – P. 572–590. DOI: 10.1108/JEDT-09-2018-0165
14. Szoszkiewicz, R. Adhesion hysteresis and friction at nanometer and micrometer length / R. Szoszkiewicz [et al.] // *Journal of applied physics.* – 2006. – Vol. 99, iss. 1 – P. 1–7. DOI: 10.1063/1.2159081
15. Белый, В.А. Адгезия полимеров к металлам // В.А. Белый [и др.]. – Минск: Наука и техника. – 1971. – 228 с.
16. Менделеев, Д.И. Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893-1898 гг. / Д.И. Менделеев. С предисл. М.А. Шателена. – Л. Гос. науч.-техн. изд-во, Ленхимсектор, 1931. – 302 с.
17. Herbert, E.G. Some Recent developments in hardness testing / E.G. Herbert // *The Engineer.* – 1923. – Vol. 135. – P. 686–687.
18. Halama, R. Mechanics of Herbert Pendulum Hardness Tester and its Application / R. Halama [et al.] // *Key Engineering Materials.* – Trans Tech Publications Ltd, 2017. – Vol. 741. – P. 122–127. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.741.122
19. Matsubara, M. Improved Herbert hardness tester / M. Matsubara, K. Sakamoto // *Experimental Techniques.* – 2012. – Vol. 36, no. 3. – P. 73–76. DOI: 10.1111/j.1747-1567.2011.00736.x
20. Suzuki, R. Hardness Measurement for Metals Using Lightweight Herbert Pendulum Hardness Tester With Cylindrical Indenter / R. Suzuki [et al.] // *Experimental Techniques.* – 2016. – Vol. 40, no. 2. – P. 795–802. DOI: 10.1111/ext.12121
21. Кузнецов, В.Д. Физика твердого тела: в 5 т / В.Д. Кузнецов. – Томск: Красное знамя, 1937–1949. – Т. 1 / Сост. при участии В.А. Жданова, Н.Ф. Кунина, Д.Д. Саратовкина. – 1937. – С. 448–480.
22. Tomlinson, G.A. CVI. A molecular theory of friction / G.A. Tomlinson // *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science.* – 1929. – Vol. 7, no. 46. – P. 905–939. DOI: 10.1080/14786440608564819
23. Gilavdary, I. Micro-slippage effects in pre-rolling induced by a disturbed and undisturbed pendulum with spherical supports / I. Gilavdary [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2014. – Vol. 228, no. 1. – P. 46–52. DOI: 10.1177/1350650113498230
24. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* –

2013. – Vol. 227, no. 6. – P. 618–628.

DOI: 10.1177/1350650112465516

25. Ковалев, А.В. Феноменологическая модель адгезионного контакта / А.В. Ковалев, И.Н. Ковалева, Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 6. – С. 575–585.

26. Григорьев, А.Я. Измерение контактной адгезии и аттракционного взаимодействия технических поверхностей / А.Я. Григорьев [и др.] // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 4. – С. 405–412.

References

1. Cross R. Coulomb's Law for rolling friction. *Amer. J. Phys.*, 2016, vol. 84, no. 3, pp. 221–230.

DOI: 10.1119/1.4938149

2. Cherepanov G.P. The laws of rolling. *Physical Mesomechanics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 242–254.

DOI: 10.1134/S1029959919030093

3. Popov V.L. Contact mechanics and friction: Physical Principles and Applications. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 2017, pp. 231–253.

DOI: 10.1007/978-3-662-53081-8

4. Popov V.L. What does friction really depend on? Robust governing parameters in contact mechanics and friction. *Physical Mesomechanics*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 115–122.

DOI: 10.1134/S1029959916020016

5. Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. New York: Oxford University Press, 1950, 372 p.

6. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge university press, 1987, 452 p.

DOI: 10.1017/CBO9781139171731

7. Mekid S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 2004, vol. 218, no. 4, pp. 305–312. **DOI:** 10.1243/1350650041762686

8. Tan X., Modafe A., Ghodssi R. Measurement and modeling of dynamic rolling friction in linear microball bearings. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006, vol. 128, pp. 891–898.

DOI: 10.1115/1.2362786

9. Amthor A., Zschaecck S., Ament C. High precision position control using and adaptive friction compensation approach. *IEEE Transactions on automatic control*, 2010, vol. 55, no. 1, pp. 274–278.

DOI: 10.1109/TAC.2009.2036307

10. Benditkis R., Neculescu D.S. Comment on rolling resistance. *Technical briefs in J. Tribology*, 1994, vol. 116, no. 3, pp. 658–659.

DOI: 10.1115/1.2928898

11. Van Spengen W. Merlijn. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective. *Microelectronics*

Reliability, vol. 43, no. 7, 2003, pp. 1049–1060.

DOI: 10.1016/S0026-2714(03)00119-7

12. Mekid S. Dedicated instruments for nano-engineering education: Integrated nano-manipulation and micro-nanomachining. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 2019, p. 0306419019846591.

DOI: 10.1177/0306419019846591

13. Mekid S., Bashmal S. Engineering manipulation at nano-scale: further functional specifications. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 572–590. **DOI:** 10.1108/JEDT-09-2018-0165

14. Szoszkiewicz R., Bhushan B., Huey B.D., Kulik A.J., Gremaud G. Adhesion hysteresis and friction at nanometer and micrometer length. *Journal of applied physics*, 2006, vol. 99, iss. 1, pp. 1–7.

DOI: 10.1063/1.2159081

15. Belyiy V.A., Egorenkov N.I., Pleskachevskiy Y.M. *Adgeziya polimerov k metallam* [Adhesion of polymers to metals]. Minsk: Nauka i tehnika Publ., 1971, 228 p.

16. Mendelev D.I. *Opytnoe issledovanie kolebaniya vesov i vozobnovlenie prototipa ili osnovnoj obrazcovoy russkoj mery massy v 1893-1898 gg.* [Experimental research: weight change and the renewal of the prototype or the main exemplary Russian measure of mass in 1893-1898], *L. Gos. nauch.-tekhn. izd-vo*, Lenhimsektor, 1931, 302 p.

17. Herbert E.G. Some Recent developments in hardness testing. *The Engineer*, 1923, vol. 135, pp. 686–687.

18. Halama R., Podešva J., Suzuki R., Matsubara M., Čech R. Mechanics of Herbert Pendulum Hardness Tester and its Application. Key Engineering Materials. *Trans Tech Publications Ltd*, 2017, vol. 741, pp. 122–127.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.741.122

19. Matsubara M., Sakamoto K. Improved Herbert hardness tester. *Experimental Techniques*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 73–76.

DOI: 10.1111/j.1747-1567.2011.00736.x

20. Suzuki R., Kaburagi T., Matsubara M., Tashiro T., Koyama T. Hardness Measurement for Metals Using Lightweight Herbert Pendulum Hardness Tester With Cylindrical Indenter. *Experimental Techniques*, 2016, vol. 40, no. 2, pp. 795–802.

DOI: 10.1111/ext.12121

21. Kuznecov V.D. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics: 5 vol.]. Tomsk: Krasnoe znamya Publ., 1937-1949, vol. 1, 1937, pp. 448–480 (in Russian).

22. Tomlinson G.A. CVI. A molecular theory of friction. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 1929, vol. 7, no. 46, pp. 905–939.

DOI: 10.1080/14786440608564819

23. Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N. Microslippage effects in pre-rolling induced by a disturbed and undisturbed pendulum with spherical supports. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2014, vol. 228, no. 1, pp. 46–52.

DOI: 10.1177/1350650113498230

24. Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, vol. 227, no. 6, pp. 618–628.

DOI: 10.1177/1350650112465516

УДК 621.382.33; 539.21

Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс

Н.И. Горбачук¹, Н.А. Поклонский¹, Я.Н. Марочкина¹, С.В. Шпаковский²

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 18.10.2019

Принята к печати 29.11.2019

Транзисторные структуры являются базовыми элементами интегральной схемотехники и часто используются для создания не только собственно транзисторов, но и диодов, резисторов, конденсаторов. Определение механизма возникновения импеданса индуктивного типа в полупроводниковых структурах является актуальной задачей, решение которой создаст предпосылки к разработке твердотельных аналогов катушек индуктивности. Цель работы – установить влияние экстракции неравновесных носителей заряда из базовой области на реактивный импеданс биполярного $p-n-p$ -транзистора.

Методом импедансной спектроскопии в интервале частот 20 Hz–30 MHz исследованы структуры на базе $p-n-p$ -транзисторов КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ». Показано, что в транзисторных структурах возможно наблюдение «эффекта отрицательной ёмкости» (импеданс индуктивного типа). Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа является накопление нескомпенсированного заряда дырок в базе, а на величину индуктивного импеданса влияет как эффективность инжекции в переходе база–эмиттер, так и эффективность экстракции в переходе база–коллектор.

Результаты работы могут быть использованы при разработке технологий формирования элементов интегральных микросхем на основе кремния с импедансом индуктивного типа.

Ключевые слова: импедансная спектроскопия, биполярный транзистор, неравновесные электроны и дырки, $p-n$ -переход, область пространственного заряда.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский.
Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого
 $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 322–330.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski.
[Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon
 $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 322–330 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance

N.I. Gorbachuk¹, N.A. Poklonski¹, Ya.N. Marochkina¹, S.V. Shpakovski²

¹Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²JSC “INTEGRAL”,
Kazintsa str., 121 A, Minsk 220108, Belarus

Received 18.10.2019

Accepted for publication 29.11.2019

Abstract

Transistor structures are the basic elements of integrated circuitry and are often used to create not only transistors themselves, but also diodes, resistors, and capacitors. Determining the mechanism of the occurrence of inductive type impedance in semiconductor structures is an urgent task, the solution of which will create the prerequisites for the development of solid-state analogs of inductors. The purpose of the work is to establish the effect of extraction of nonequilibrium charge carriers from the base region on the reactive impedance of a bipolar $p-n-p$ transistor.

Using impedance spectroscopy in the frequency range 20 Hz–30 MHz, the structures based on $p-n-p$ transistors KT814G manufactured by JSC “INTEGRAL” were studied. It is shown that in the transistor structures it is possible to observe the “effect of negative capacitance” (inductive type impedance). It is established that the most probable cause of the inductive type impedance is the accumulation of uncompensated charge of holes in the base, the value of inductive impedance is influenced by both the injection efficiency in the base–emitter junction and the extraction efficiency in the base–collector junction.

The results can be applied in the elaboration of technologies for the formation of elements of silicon based integrated circuits with an impedance of inductive type.

Keywords: impedance spectroscopy, bipolar transistor, nonequilibrium electrons and holes, $p-n$ -junction, space charge region.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Адрес для переписки:

Н.И. Горбачук
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Address for correspondence:

N.I. Gorbachuk
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: gorbachuk@bsu.by

Для цитирования:

Н.И. Горбачук, Н.А. Поклонский, Я.Н. Марочкина, С.В. Шпаковский.
Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого
 $p-n-p$ -транзистора на его реактивный импеданс.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 322–330.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

For citation:

N.I. Gorbachuk, N.A. Poklonski, Ya.N. Marochkina, S.V. Shpakovski.
[Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon
 $p-n-p$ Transistor on its Reactive Impedance].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 322–330 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

Введение

Элементы с индуктивным импедансом достаточно часто используются в схемотехнике аналоговых интегральных микросхем [1]. Основными способами формирования элемента цепи с индуктивным импедансом является создание плёночных металлических индуктивностей (спиралей) [2] и имитация индуктивной нагрузки с помощью операционных усилителей [3], однако и то и другое приводит к нерациональному использованию площади на микросхеме. В связи с этим представляет интерес так называемый «эффект отрицательной ёмкости» (вид представления реактивной проводимости индуктивного типа) [4].

Отрицательная ёмкость наблюдалась в различных полупроводниковых структурах, таких как халькогенидные плёнки [5], полуизолирующий поликристаллический кремний [6], многослойные гетероструктуры [7, 8], границы раздела металл–полупроводник [9]. Физические механизмы, приводящие к возникновению отрицательной ёмкости в различных полупроводниковых структурах, существенно различаются. Предполагается, что в диодах с p - n -переходом эффект отрицательной ёмкости обусловлен модуляцией проводимости электронейтральной области неосновными носителями заряда при больших амплитудах переменного тока [10]. В [11] обнаружена зависимость вещественной и мнимой частей импеданса диодов как от постоянной составляющей тока, так и от частоты сигнала. Было установлено [11], что при некоторой плотности тока характер реактивного сопротивления (мнимой части импеданса) диода меняется с ёмкостного на индуктивный. В работе [12] высказано предположение, что основную роль в формировании импеданса индуктивного типа для диодов, содержащих точечные дефекты и их комплексы, играют центры прилипания, аккумулирующие носители заряда в течение времени порядка полупериода колебаний тока в цепи. Аналогичный эффект наблюдался в кремниевых фотодиодах, облученных нейтронами [13].

Ранее нами в работе [14] отмечено немонотонное изменение ёмкости прямосмещённого перехода база–эмиттер. Для значений $I_B \geq 45 \mu\text{A}$ при частотах $f < 50 \text{ Hz}$ наблюдался положительный угол сдвига фаз между колебаниями тока и напряжения, что характерно для импеданса индуктивного типа. Вероятной причиной данного

эффекта могут быть особенности накопления носителей заряда в базе, в том числе и недостаточная эффективность их экстракции.

Транзисторные структуры являются базовыми элементами интегральной схемотехники и часто используются для создания не только собственно транзисторов, но и диодов, резисторов, конденсаторов [15]. Поэтому представляет интерес исследование особенностей формирования импеданса в индуктивного типа (отрицательной ёмкости) в транзисторных структурах для оценки перспектив применения их в качестве твердотельных аналогов катушек индуктивности.

Цель работы – установить влияние экстракции неравновесных носителей заряда из базовой области на реактивный импеданс p - n -переходов биполярного p - n - p -транзистора.

Методика эксперимента

Исследовались p - n - p -транзисторы КТ814Г производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Технология изготовления транзисторов приведена в работе [14].

Для проведения измерений выводы базы и коллектора транзистора соединялись друг с другом через резистор сопротивлением R_1 так, как это показано на рисунке 1. Соответственно, исследуемые структуры представляли собой двухполюсник, в котором параллельно переходу база–коллектор подсоединен резистор. Варьирование сопротивления резистора позволяло изменять ток базы. Использовались резисторы с сопротивлением: 1,2 МΩ, 370 кΩ, 160 кΩ, 100 кΩ, 50 кΩ. В диапазоне частот от $f = 20 \text{ Hz}$ до 30 МГц активное сопротивление резисторов практически не зависело от частоты переменного тока, а индуктивность не превышала 10 нН.

Измерения зависимостей действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ от частоты $f = \omega/2\pi$ переменного тока проводились на измерителях *LCR Agilent E4980A* и *Agilent 4285A* в диапазоне от 20 Hz до 30 МГц. Амплитуда синусоидального напряжения не превышала 40 мV. Все измерения проводились при комнатной температуре. Погрешность измерения действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса не превышала 3 %. Графики зависимостей действительной и мнимой частей импеданса от частоты f переменного тока и годографы импеданса строились по стандартной методике [16]. Для удобства

сравнения с результатами измерений барьерных полупроводниковых структур и композиционных материалов, обладающих, как правило, реактивным импедансом ёмкостного типа [17, 18] при построении графиков значения Z'' умножались на -1 .

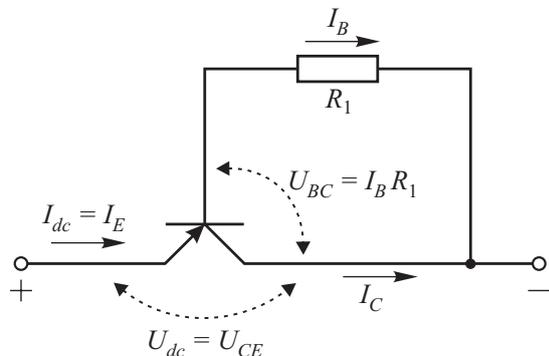


Рисунок 1 – Электрическая схема двухполюсника

Figure 1 – Circuit diagram of two-terminal device

Выполнялись три серии измерений.

1) В первой серии измерений сопротивление резистора оставалось постоянным $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$. Одновременно с синусоидальным измерительным сигналом к структуре прикладывалось постоянное напряжение смещения U_{dc} . В соответствии со схемой, представленной на рисунке 1, напряжение смещения U_{dc} равно постоянному напряжению коллектор–эмиттер транзистора $U_{dc} = U_{CE}$. Напряжение смещения варьировалось в интервале от 0 до 0,7 В. При этом величина постоянного тока I_{dc} через структуру изменялась от 0 до 50 μA . Ток I_{dc} двухполюсника равен постоянной составляющей тока эмиттера транзистора: $I_{dc} = I_E = I_B + I_C$, где I_B и I_C – постоянные составляющие токов базы и коллектора. Дополнительный контроль I_B и I_E проводился независимо по известной методике [19]. Значения постоянной составляющей токов базы и эмиттера приведены в таблице 1. Погрешность измерения I_B и I_E в экспериментах данной серии и последующих измерениях не превышала 5 %.

2) В ходе второй серии измерений на двухполюснике поддерживалось постоянное значение напряжения $U_{dc} = U_{CE} = 0,600 \pm 0,005 \text{ V}$. Ток базы варьировался в интервале от 100 нА до 1,20 μA , за счет использования различных резисторов R_1 : 1,2 М Ω , 370 к Ω , 160 к Ω , 100 к Ω , 50 к Ω . При этом величина постоянного тока $I_{dc} = I_E$ через структуру изменялась от 10 до 150 μA , а напряжение на коллекторном переходе $U_{BC} = I_B R_1$ (если пренебречь падением напряжения на активной области

базы) – от 48 до 130 мВ. Контроль величины постоянной составляющей тока базы I_B проводился аналогично первой серии измерений. Значения постоянной составляющей тока базы и тока эмиттера приведены в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

Значения постоянного напряжения эмиттер–коллектор $U_{CE} = U_{dc}$, постоянных токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B в первой серии измерений

Values of emitter–collector direct current voltage $U_{CE} = U_{dc}$ and direct currents of emitter $I_E = I_{dc}$ and base I_B in the first series of measurements

Curve number in Figures 2 and 3	$U_{CE} = U_{dc}$, V	$I_E = I_{dc}$, μA	I_B , nA
#1	0	0	0
#2	$0,400 \pm 0,008$	$0,46 \pm 0,02$	10 ± 1
#3	$0,420 \pm 0,008$	$1,27 \pm 0,05$	25 ± 1
#4	$0,450 \pm 0,009$	$2,40 \pm 0,10$	50 ± 2
#5	$0,500 \pm 0,010$	$7,70 \pm 0,31$	110 ± 5
#6	$0,600 \pm 0,012$	$26,6 \pm 1,1$	300 ± 15
#7	$0,700 \pm 0,014$	$49,8 \pm 2,0$	530 ± 25

Таблица 2 / Table 2

Значения постоянного постоянных токов эмиттера $I_E = I_{dc}$ и базы I_B во второй серии измерений

Values of direct currents of emitter $I_E = I_{dc}$ and base I_B in the second series of measurements

Curve number in Figure 4	$I_E = I_{dc}$, μA	I_B , nA
#1	$8,43 \pm 0,25$	110 ± 5
#2	$14,3 \pm 0,4$	170 ± 8
#3	$26,6 \pm 0,8$	300 ± 15
#4	$64,4 \pm 1,9$	680 ± 34
#5	110 ± 3	1110 ± 56

3) В третьей серии измерений поддерживалось постоянное значение тока через структуру $I_{dc} = I_E = 27,0 \pm 0,8 \mu\text{A}$. Ток базы при этом оставался на уровне $I_B = 300 \pm 30 \text{ nA}$. Контроль тока базы проводился так же, как и в первых двух сериях измерений. В эксперименте использовались различные резисторы R_1 : 1,2 М Ω , 370 к Ω , 160 к Ω , 100 к Ω , 50 к Ω . Вследствие этого напря-

жение $U_{CE} = U_{dc}$ изменялось в интервале от 0,5 до 0,7 В. Значения постоянного напряжения U_{CE} приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Значения постоянного напряжения эмиттер–коллектор $U_{CE} = U_{dc}$ и база–коллектор $U_{BC} = I_B R_1$ в третьей серии измерений

Values of direct current voltage of emitter–collector $U_{CE} = U_{dc}$ and base–collector $U_{BC} = I_B R_1$ in the third series of measurements

Curve number in Figure 5	$U_{CE} = U_{dc}$, V	$U_{BC} = I_B R_1$, V
#1	$0,700 \pm 0,005$	$0,360 \pm 0,040$
#2	$0,597 \pm 0,005$	$0,110 \pm 0,010$
#3	$0,550 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,005$
#4	$0,531 \pm 0,005$	$0,030 \pm 0,004$
#5	$0,513 \pm 0,005$	$0,015 \pm 0,002$

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рисунке 2а представлены зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют таблице 1. В процессе измерений варьировалось $U_{dc} = U_{CE}$. Ток базы ограничивался резистором $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$.

В том случае, когда транзистор находится в активном режиме $U_{dc} \geq 0,7 \text{ V}$, на зависимостях действительной части импеданса от частоты присутствуют два плато (т. е. участки со слабой зависимостью $Z'(f)$). Одно – при $f < 103 \text{ Hz}$, второе – в интервале частот 103–106 Hz. Особенности зависимостей $Z'(f)$ и $-Z''(f)$ для структур $U_{dc} \geq 0,7 \text{ V}$ проанализированы в [14]. В данной работе рассматриваются поведение частотных зависимостей импеданса при $U_{dc} < 0,7 \text{ V}$. Из данных, представленных на рисунке 2а, следует, что при напряжениях смещения $0,7 \text{ V} > U_{dc} > 0 \text{ V}$ на зависимостях $Z'(f)$ наблюдается низкочастотное плато (при $f < 103 \text{ Hz}$) и постепенно «вырождающееся» высокочастотное (при $f > 106 \text{ Hz}$). На рисунке плато выделены пунктирными овалами и обозначены I и III соответственно. Характерной особенностью кривых 2–6 является наличие участков роста Z' по мере увеличения f . На рисунке 2а они выделены и обозначены как область II. Увеличение Z' при росте f возможно в том случае, когда в системе (цепи) присутствует [16] элемент с индуктивным ($Z'' > 0$) импедансом.

На рисунке 2b показаны зависимости мнимой части импеданса от частоты. На зависимостях четко видны участки, соответствующие импедансу индуктивного типа, для которых $-Z'' < 0$, т. е. мнимая часть импеданса Z'' положительна.

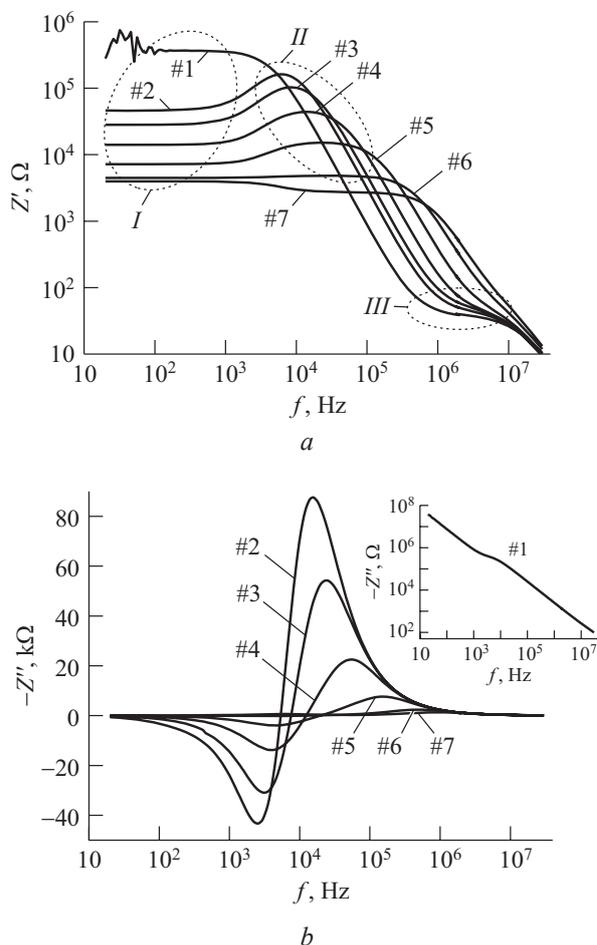


Рисунок 2 – Зависимости действительной $Z'(a)$ и мнимой $Z''(b)$ частей импеданса от частоты f переменного тока. Номера кривых соответствуют таблице 1; $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

Figure 2 – Dependences of real $Z'(a)$ and imaginary $Z''(b)$ parts of impedance on frequency f of alternating current. Curve numbers correspond to Table 1; $R_1 = 370 \text{ k}\Omega$

На рисунке 3 представлены годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Для значений напряжения смещения $0,7 \text{ V} > U_{dc} > 0 \text{ V}$ годографы имеют характерный вид «спиралей» [16], что дополнительно иллюстрирует смену знака реактивного импеданса исследуемых структур при увеличении частоты в рассматриваемом интервале $U_{dc} = U_{CE}$. При переходе в активный режим работы биполярного транзистора вид годографов (кривая #7) соответствует данным работы [14].

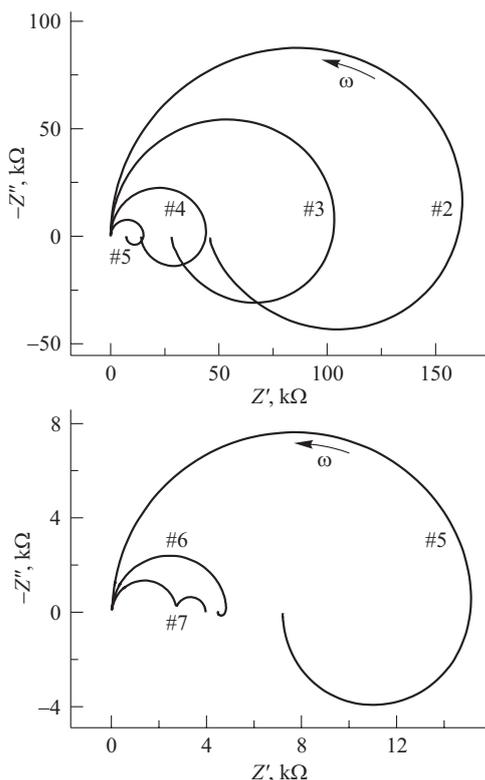


Рисунок 3 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$. Номера кривых соответствуют таблице 1 и рисунку 2; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота

Figure 3 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$. Curve numbers correspond to Table 1 and Figure 2; $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency

Наличие импеданса индуктивного типа может быть связано как с геометрией базы, так и с особенностями накопления заряда в ней. Геометрия базы может влиять на величину индуктивного импеданса в том случае, когда изменение тока через активную область базы вызывает изменение магнитного потока. Фактически это индуктивность в «стандартном» понимании данного термина. Величина такой индуктивности не превышает сотен наногенри [12]. Если бы главную роль в формировании индуктивного импеданса исследуемых структур играла именно она, то в рассматриваемом диапазоне частот положительный угол сдвига фаз φ между колебаниями тока и напряжения не превышал бы единиц градусов. В наших же экспериментах φ достигало значений 25° и более. Поэтому наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа являются особенности накопления заряда в базе.

На величину заряда, накопленного в базе, влияют как эффективность инжекции в переходе

база–эмиттер, так и эффективность экстракции в переходе база–коллектор. В первой серии экспериментов изменялся как уровень инжекции неравновесных носителей в базу через эмиттерный переход, так и напряжение на коллекторном переходе. Причем большая часть прикладываемой к структуре разности потенциалов приходилась на переход эмиттер–база. Для проверки влияния инжекции на формирование импеданса индуктивного типа проводилась вторая серия измерений, в ходе которых на двухполюснике поддерживалось постоянное значение напряжения $U_{dc} = U_{CE} = 0,600 \pm 0,005$ В. Ток базы варьировался в интервале от 100 нА до 1,20 мА. На рисунке 4а показаны годографы импеданса исследуемых структур. Номера кривых на рисунке соответствуют таблице 2. Видно, что индуктивный импеданс появляется только при токах базы $I_B \geq 170$ нА.

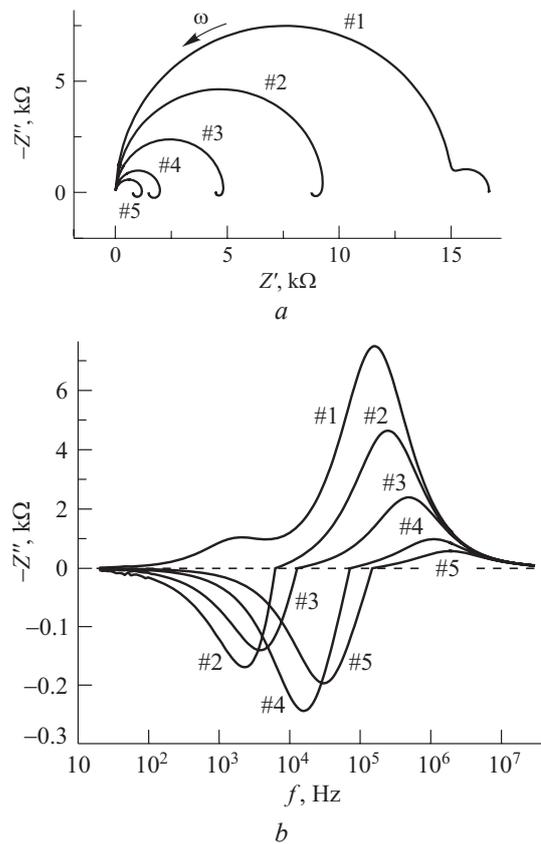


Рисунок 4 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$ (а) и зависимости мнимой части импеданса Z'' от частоты f переменного тока (б). Номера кривых соответствуют таблице 2

Figure 4 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$ (a) and dependences of imaginary part of impedance Z'' on frequency f of alternating current (b). Curve numbers correspond to Table 2

На рисунке 4*b* показаны зависимости мнимой части импеданса от частоты. Минимумы (и «точки» смены знака мнимой части импеданса) на зависимостях $-Z''(f)$ сдвигаются в сторону высоких частот по мере роста тока инжекции. Таким образом, сопоставление результатов эксперимента, представленных на рисунках 2 и 3, с данными, приведёнными на рисунке 4, подтверждает предположение о влиянии на величину индуктивного импеданса тока инжекции в переходе база–эмиттер. Отметим, что в случае меньших значений $U_{dc} = U_{CE}$ импеданс индуктивного типа наблюдался и при более низких токах базы. Например, для $U_{dc} = U_{CE} = 0,45$ было достаточно $I_B = 50$ нА (см. рисунки 2–4).

Для проверки влияния эффективности экстракции носителей заряда через коллекторный переход в третьей серии измерений поддерживалось постоянное значение тока через структуру $I_{dc} = I_E = 27,0 \pm 0,5$ мА. Ток базы при этом оставался на уровне $I_B = 300 \pm 30$ нА, а напряжение $U_{CE} = U_{dc}$ изменялось в интервале от 0,513 до 0,700 В.

На рисунке 5*a* показаны годографы импеданса исследуемых структур. Номера кривых на рисунке соответствуют таблице 3. Видно, что индуктивный импеданс появляется только при $U_{dc} = U_{CE} \leq 0,6$ В. Как следует из данных, представленных на рисунке 5*b*, при снижении U_{CE} величина импеданса индуктивного типа увеличивается. Также наблюдается сдвиг минимума на зависимостях $-Z''(f)$ в сторону высоких частот.

Интервал напряжений U_{CE} , рассматриваемый в настоящей работе, соответствует случаю, когда переход база–коллектор закрыт. Инжекция в базу со стороны коллектора мала. Даже при $U_{BC} = I_B R_1 = 0,015 \pm 0,002$ В (зависимость 5 на рисунке 4) высота энергетического барьера достаточна для того, чтобы ей пренебречь. Рост $U_{BC} = I_B R_1$ приводит к увеличению высоты энергетического барьера коллекторного перехода, что естественным образом повышает эффективность экстракции носителей заряда, инжектированных в базу через эмиттерный переход. Соответственно, на рисунке 5 наблюдается трансформация зависимостей $-Z''(f)$. Если для кривых #5 характерно чёткое проявление импеданса индуктивного типа, то при $U_{BC} = I_B R_1 = 0,360 \pm 0,040$ В (кривые #1) на зависимостях $-Z''(f)$ (и на годографах) отсутствуют участки, соответствующие импедансу индуктивного типа.

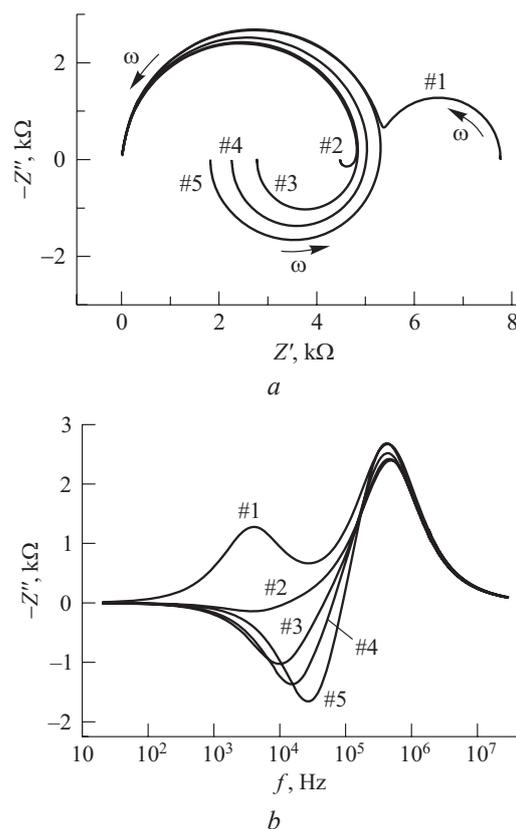


Рисунок 5 – Годографы импеданса $Z = Z' + iZ''$ (а) и зависимости мнимой Z'' части импеданса от частоты f переменного тока (б). Номера кривых соответствуют таблице 3

Figure 5 – Nyquist diagram for impedance $Z = Z' + iZ''$ (a) and dependences of imaginary part of impedance Z'' on frequency f of alternating current (b). Curve numbers correspond to Table 3

Таким образом, можно утверждать что эффективность экстракции носителей заряда через коллекторный переход также оказывает существенное влияние на формирование импеданса индуктивного типа в транзисторных структурах.

Заключение

В транзисторных структурах $p-n-p$ -типа наблюдался эффект отрицательной ёмкости (импеданс индуктивного типа). Установлено, что наиболее вероятной причиной возникновения импеданса индуктивного типа является накопление заряда в базовой области транзистора. Показано, что на индуктивный импеданс влияет не только величина тока инжекции дырок (неосновных носителей заряда) через переход база–эмиттер, но и эффективность экстракции дырок через переход база–коллектор.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» и «Физматтех».

Список использованных источников

1. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York: Wiley, 2002. – xxiv+740 p.

2. Burghartz, J.N. Integrated circuit inductor: пат. 5884990 США, МПК6 H01F 5/00 / J.N. Burghartz [et al.]; заявитель International Business Machines Corporation; заявл. 14.10.1997; опубл. 23.03.1999.

3. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832+942 с.

4. Пенин, Н.А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах / Н.А. Пенин // Физика и техника полупроводников. – 1996. – Т. 30, № 4. – С. 626–634.

5. Гибадатов, И.Ю. Индуктивный импеданс в гетроструктурах металл – халькогенидный стеклообразный полупроводник – кристаллический полупроводник / И.Ю. Гибадатов, А.С. Глебов // Письма в Журнал технической физики. – 1990. – Т. 16, № 1. – С. 22–25.

6. Butcher, K.S.A. An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitance in semiconductors / K.S.A. Butcher, T.L. Tansley, D. Alexiev // Solid-State Electronics. – 1996. – Vol. 39, № 3. – P. 333–336.

DOI: 10.1016/0038-1101(95)00143-3

7. Болтаев, А.П. Отрицательная емкость в гетроструктурах Ni–TiO₂–p–Si / А.П. Болтаев [и др.] // Микроэлектроника. – 1995. – Т. 24, № 4. – С. 291–294.

8. Болтаев, А.П. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетроструктурах на основе кремния / А.П. Болтаев [и др.] // Известия РАН. – 1999. – Т. 63, № 2. – С. 312–316.

9. Parravicini, G.B. Low-frequency negative capacitance effect in system of metallic nanoparticles embedded in dielectric matrix / G.B. Parravicini [et al.] // Applied Physics Letters. – 2004. – Vol. 85, № 2. – P. 302–304. DOI: 10.1063/1.1772872

10. Ershov, M. Negative capacitance effect in semiconductor devices / M. Ershov [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1998. – Vol. 45, № 10. – P. 2196–2206. DOI: 10.1109/16.725254

11. Jones, B.K. Negative capacitance effects in semiconductor diodes / B.K. Jones, J. Santana, M. McPherson // Solid State Communications. – 1998. – Vol. 107, № 2. – P. 47–50.

DOI: 10.1016/S0038-1098(98)00162-8

12. Поклонский, Н.А. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p^+ – n -переходов, облученных быстрыми электронами / Н.А. Поклонский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 7. – С. 824–828.

DOI: 10.1134/S1063782606070128

13. McPherson, M. Capacitive effects in neutron-irradiated silicon diodes / M. McPherson // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2002. – Vol. 488, № 1–2. – P. 100–109.

DOI: 10.1016/S0168-9002(02)00480-1

14. Горбачук, Н.И. Контроль дифференциального сопротивления p – n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии / Н.И. Горбачук [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 253–262.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

15. ULSI Technology / Ed. by C.Y. Chang, S.M. Sze. – New York: McGraw-Hill, 1996. – xxvi+726 p.

16. Impedance spectroscopy: Theory experiment, and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – Hoboken: Wiley, 2018. – xviii+528 p.

DOI: 10.1002/9781119381860

17. Поклонский, Н.А. Электропроводность композиционных материалов на основе мелкодисперсного кремния вблизи перехода диэлектрик–металл / Н.А. Поклонский [и др.] // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40, № 11. – С. 1293–1298.

18. Poklonski, N.A. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions / N.A. Poklonski [et al.] // Microelectronics Reliability. – 2010. – Vol. 50, № 6. – P. 813–820.

DOI: 10.1016/j.microrel.2010.02.007

19. Sze, S.M. Semiconductor devices: Physics and technology / S.M. Sze, M.K. Lee. – New York: Wiley, 2012. – x+578 p.

Acknowledgments

The work is supported by the Belarusian National Research Programs “Photonics, opto- and microelectronics” and “Fizmattekh”.

References

1. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York, Wiley, 2002, xxiv+740 p.

2. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit inductor, Patent USA 5884990, Int. Cl. 6 H01F 5/00, Assignee: International Business Machines Corporation, Filed: 14.10.1997, Date of Patent: Mar. 23, 1999.

3. Tietze U., Shenk Ch. Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin, Springer, 2002, xxvi+1606 p.

4. Penin N.A. Negative capacitance in semiconductor structures. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 4, pp. 340–343.

5. Gibadatov I.Yu., Glebov A.S. [Inductive impedance in metal – chalcogenide glass-like semi-conductor – crystal semiconductor structures]. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* [Soviet Technical Physics Letters], 1990, vol. 16, no. 1, pp. 22–25 (in Russian).

6. Butcher K.S.A., Tansley T.L., Alexiev D. An instrumental solution to the phenomenon of negative capacitance in semiconductors. *Solid-State Electronics*, 1996, vol. 39, no. 3, pp. 333–336.

DOI: 10.1016/0038-1101(95)00143-3

7. Boltaev A.P., Burbaev T.M., Kalyuzhnaya G.A., Kurbatov V.A., Penin N.A. Negative capacitance in Ni-TiO₂-p-Si heterostructures. *Russian Microelectronics*, 1995, vol. 24, no. 4, pp. 255–258.

8. Boltaev A.P., Burbaev T.M., Kurbatov V.A., Rzaev M.M., Penin N.A., Sibeldin N.N. [Charge accumulation effects and negative capacitance in heterostructures based on silicon]. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya*, 1999, vol. 63, no. 2, pp. 312–316 (in Russian).

9. Parravicini G.B., Stella A., Ungureanu M.C., Kofman R. Low-frequency negative capacitance effect in system of metallic nanoparticles embedded in dielectric matrix. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 2, pp. 302–304. **DOI:** 10.1063/1.1772872

10. Ershov M., Liu H.C., Li L., Buchanan M., Wasilewski Z.R., Jonscher A.K. Negative capacitance effect in semiconductor devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 10. – P. 2196–2206.

DOI: 10.1109/16.725254

11. Jones B.K., Santana J., McPherson M. Negative capacitance effects in semiconductor diodes. *Solid State Communications*, 1998, vol. 107, no. 2, pp. 47–50.

DOI: 10.1016/S0038-1098(98)00162-8

12. Poklonski N.A., Shpakovski S.V., Gorbachuk N.I., Lastovskii S.B. Negative capacitance (impedance of the inductive type) of silicon p⁺-n junctions irradiated with fast electrons. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 7, pp. 803–807.

DOI: 10.1134/S1063782606070128

13. McPherson M. Capacitive effects in neutron-irradiated silicon diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, vol. 488, no. 1–2, pp. 100–109. **DOI:** 10.1016/S0168-9002(02)00480-1

14. Gorbachuk N.I., Poklonski N.A., Marochkina Ya.N., Shpakovski S.V. [Controlling of differential resistance of p-n-junctions of bipolar transistor in active mode by method of impedance spectroscopy]. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 253–262 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-253-262

15. ULSI Technology, ed. by C.Y. Chang, S.M. Sze. New York, McGraw-Hill, 1996, xxvi+726 p.

16. Impedance Spectroscopy: Theory Experiment, and Applications, ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, Wiley, 2018, xviii+528 p.

DOI: 10.1002/9781119381860

17. Poklonskii N.A., Gorbachuk N.I., Pototskii I.V., Trofimchuk D.A. Electrical conductivity of composite materials based on fineparticle silicon near the metal-insulator transition. *Inorganic Materials*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1133–1137.

DOI: 10.1023/B:INMA.0000048209.93137.12

18. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A., Wieck A., Markevich V.P. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions. *Microelectronics Reliability*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 813–820. **DOI:** 10.1016/j.microrel.2010.02.007

19. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*, New York, Wiley, 2012, x+578 p.

УДК 681.32

Моделирование работы навигационного приёмника для сверхмалого космического аппарата

А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников

Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 08.07.2019

Принята к печати 24.09.2019

В настоящее время к сверхмалым космическим аппаратам предъявляются жёсткие требования в части точности определения положения спутника на орбите, при этом на спутник накладываются ограничения по массе, габаритам и потребляемой мощности. Целью данной работы являлось моделирование работы навигационного приёмника сверхмалого космического аппарата с ограничениями по энергопотреблению и вычислительным ресурсам.

Рассмотрены условия эксплуатации и определены требования к бортовому навигационному приёмнику сверхмалого космического аппарата. Описана работа на начальной стадии эксплуатации навигационного приёмника, тестирование работоспособности, детектирование ошибок, анализ достоверности решения задачи навигационно-временного определения.

Разработана структура задач проектной баллистики по прогнозированию орбит сверхмалого космического аппарата и навигационных спутников, интервалов радиовидимости для систем ГЛОНАСС и *GPS*, а также параметров навигационных сигналов.

Для предполагаемой орбиты спутника *CubeBel-1* проведено численное моделирование орбитального движения относительно спутников систем *GPS* и ГЛОНАСС. Рассчитана динамика доплеровского сдвига частоты сигналов спутника *GPS* в приёмнике без ограничений по относительной скорости движения за одни сутки. Для спутников систем *GPS* и ГЛОНАСС рассчитаны интервалы радиовидимости и определены оптимальные условия для холодного старта навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости ($V_{\text{отн}} < 500$ м/с) за 1 ч работы как при отдельной, так и при совместной работе по обеим системам.

Для отработки методов верификации экспериментальных данных спутника *CubeBel-1* исследована работа навигационного приёмника спутника *Nsight* по данным принимаемой телеметрии от начала его полёта до момента выхода в стабильный режим работы. Показано, что данные телеметрии навигационного приёмника на этапе тестирования имели существенную ошибку. После программной корректировки навигационный приёмник работал стабильно в течении всей недели наблюдения, ошибка измерений долготы и широты не превышала $0,2^\circ$.

Ключевые слова: сверхмалый космический аппарат, навигационный приёмник, проектная баллистика, орбитальное движение, интервалы радиовидимости.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

Адрес для переписки:

А.А. Спиридонов
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: sansan@tut.by

Address for correspondence:

A.A. Spiridonov
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: sansan@tut.by

Для цитирования:

А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников.
Моделирование работы навигационного приёмника для сверхмалого космического аппарата. Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 4. – С. 331–340.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

For citation:

A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saechnikov.
[Simulation of Navigation Receiver for Ultra-Small Satellite].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 331–340 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

Simulation of Navigation Receiver for Ultra-Small Satellite

A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saechnikov

Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus

Received 08.07.2019

Accepted for publication 24.09.2019

Abstract

Currently, ultra-small satellite are subjects to stringent requirements in terms of the accuracy of determining the position of the satellite in orbit, while the satellite is the subject to restrictions on mass, size and power consumption. The aim of this work is to simulate of navigation receiver operation for the ultra-small satellite with restrictions on energy consumption and computational resources.

The operating conditions are considered and the requirements to the onboard navigation receiver for the ultra-small satellite are determined. The navigation receiver operation at the initial stage, performance testing, error detection, analysis of the reliability of the solution of the navigation-time determination problem are described.

The structure of the design ballistics problems for orbit prediction of ultra-small spacecraft and navigation satellites, radio visibility intervals for GLONASS and GPS systems, parameters of navigation signals have been developed.

The motion relative to the satellite systems GPS and GLONASS for a preliminary orbit of CubeBel-1 have been simulated. The Doppler dynamics of the GPS satellite signals in the receiver without restrictions on the relative speed for one day has been calculated. Radio visibility intervals for GPS and GLONASS satellites were calculated and optimal conditions for the cold start of the navigation receiver with a relative speed limit ($V_r < 500$ m/s) for 1 hour of operation both in separate and in joint operation on both systems were determined.

To test the verification methods of the experimental data of the CubeBel-1 satellite, the operation of the navigation receiver of the Nsight satellite was studied according to the received telemetry from the beginning of its flight until the moment it entered stable operation. It is shown that the telemetry data of the navigation receiver at the testing stage had a significant error. After software correction, the navigation receiver worked steadily throughout the week of observation, the error of longitude and latitude measurements did not exceed 0.2 degrees.

Keywords: ultra-small satellite, navigation receiver, project ballistics, orbital motion, radio visibility intervals.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

Адрес для переписки:

А.А. Спиридонов
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: sansan@tut.by

Address for correspondence:

A.A. Spiridonov
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: sansan@tut.by

Для цитирования:

А.А. Спиридонов, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников.
Моделирование работы навигационного приёмника
для сверхмалого космического аппарата.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 331–340.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

For citation:

A.A. Spiridonov, D.V. Ushakov, V.A. Saechnikov.
[Simulation of Navigation Receiver for Ultra-Small Satellite].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 331–340 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-331-340

Введение

В настоящее время, в связи с повышением уровня сложности научных задач, к сверхмалым космическим аппаратам (массой не более 10 кг) предъявляются жёсткие требования в части точности определения положения спутника на орбите [1–3]. Для обработки данных научной аппаратуры, датчиков телеметрии, цифровых камер сверхмалых космических аппаратов (СМКА), необходима их точная навигационно-временная привязка [4–6]. Кроме того, для проведения большинства космических экспериментов нужно знать траекторию движения СМКА, точное время и место включения аппаратуры, изменения режима её работы, а также момент переориентации в пространстве осей чувствительности этой аппаратуры [7–8]. Навигационные приёмники также используются на борту СМКА для решения научных задач, например, радиозатменного зондирования ионосферы [9–10].

Большинство современных СМКА не имеют на борту навигационного приёмника из-за его дороговизны, ограничений по энергопотреблению и вычислительным ресурсам. Для прогнозирования и расчёта орбиты СМКА пользуются данными усреднённых орбитальных элементов в формате *TLE* (*two-line elements* – двухстрочный набор элементов) системы *NORAD* (*North American Aerospace Defense Command* – Командование воздушно-космической обороны Северной Америки). Расчёт по этим данным даёт точность определения координат около 1 км, которая уменьшается с увеличением разности между расчётным временем и временем эпохи *TLE* [11]. Кроме того, эти данные

в формате *TLE* можно использовать только с моделями системы *NORAD*. Если точность прогнозирования орбит СМКА по *TLE*-данным для задач слежения, проведения сеансов связи достаточна, то для задач привязки данных высокоточных измерений и проведения экспериментов в космосе её уже не хватает. Коммерческие навигационные приёмники, разработанные для наземных приложений, в орбитальных условиях могут иметь проблемы, связанные с программным обеспечением. Из-за экспортных ограничений США большинство гражданских *GPS*-приёмников не могут решать задачу навигационного определения при высоте выше 18 км над уровнем моря и скорости выше 500 м/с [3]. Эту проблему можно решить, настроив параметры прошивки программного обеспечения (ПО).

Поиск сигнала навигационного приёмника СМКА осуществляется по задержке и доплеровскому сдвигу частот. Если для наземных потребителей диапазон значений доплеровского сдвига частот составляет ± 5 кГц [8], то для низкоорбитальных космических аппаратов он имеет порядок ± 40 кГц [12]. Важным является задача предсказания диапазона этого параметра для каждого навигационного спутника в данной точке орбиты, это может существенным образом уменьшить время «холодного» старта навигационного приёмника СМКА, которое составляет порядка 90–120 с [13–14].

В таблице 1 приведены примеры одно- и двухчастотных бортовых навигационных приёмников, которые имеют успешную полётную историю [3, 4, 14], в таблице 2 приведены примеры использования бортовых навигационных приёмников для СМКА.

Таблица 1 / Table 1

Характеристики одно- и двухчастотных бортовых навигационных приёмников с успешной полётной историей

Characteristics of single- and dual-frequency onboard navigation receivers with a successful flight history

Название Name	Каналы Channels	Средняя мощность (мВт) Average power (mW)	Масса (г) Mass (g)
<i>SSTL SGR-05</i>	12 сигналов <i>GPS</i> (C/A-код) 12 <i>GPS</i> signals (C/A-code)	800	20
<i>DLR Phoenix</i>	12 сигналов <i>GPS</i> (C/A-код) 12 <i>GPS</i> signals (C/A-code)	850	20
<i>NovAtel-OEMV-1-L1</i>	14 сигналов <i>GPS</i> (C/A-код) 14 <i>GPS</i> signals (C/A-code)	1100	22
<i>NSS GPS</i>	12 сигналов <i>GPS</i> (C/A-код) 12 <i>GPS</i> signals (C/A-code)	1000	110
<i>piNAV-L1</i>	15 сигналов <i>GPS</i> (C/A-код) 15 <i>GPS</i> signals (C/A-code)	500	24
МНП-М6	24 сигнала ГЛОНАСС (СТ-код), <i>GPS</i> (C/A-код) и <i>SBAS</i> 24 <i>GLONASS</i> signals (SP code), <i>GPS</i> signals (C/A code) and <i>SBAS</i>	800	6

Таблица 2 / Table 2

Примеры использования бортовых навигационных приёмников для СМКА Examples of use of onboard navigation receivers for USS

Название Name	Год запуска Launch Year	Разработчики Developers	Масса (кг) Mass (kg)	Бортовой навигационный приёмник Onboard navigation receiver
<i>Compass-1</i>	2008	FH Aachen, Germany	1	Phoenix
<i>AggieSat-2</i>	2009	Texas A&M Univ., USA	3,5	DRAGON
<i>AISSat-1</i>	2010	Norwegian Space Centre, Norway	6	OEM4-G2L
<i>Jugnu</i>	2011	ИТ Kanpur, India	3	OEMV-1-L1
<i>Goliat</i>	2012	Univ.of Bucharest, Romania	1	Phoenix 2
<i>STRaND-1</i>	2013	SSTL, UK	4,3	SGR-05
<i>nSight-1</i>	2017	SCS Aerospace Group (SCSAG), South Africa	2	NSS) GPS
<i>CubeBel-1</i>	2018	BSU, Republic of Belarus	2	МНП-М6

Выбор навигационного приёмника для СМКА должен быть обоснован проектировщиком космического аппарата. Это можно сделать с помощью моделирования работы, функционального тестирования и проведения испытаний на симуляторах, для того чтобы проверить соответствие навигационного приемника требованиям миссии. Целью данной работы являлось моделирование работы навигационного приёмника сверхмалого космического аппарата с ограничениями по энергопотреблению и вычислительным ресурсам.

Анализ требований к бортовым навигационным приёмникам

Коммерческие электронные компоненты, предназначенные для наземного использования, будут работать в космосе в более жёстких условиях и их ресурс будет в разы меньше, чем при их работе на Земле. Космическая среда сильно отличается от той, что есть на Земле, и потенциально очень враждебна к электронике и материалам. Так для высоты орбиты около 500 км компоненты в космосе будут находиться в глубоком вакууме (давление составляет $3,2 \cdot 10^{-6}$ Па), подвергаться экстремально холодным и горячим температурам (от минус 100 °С до плюс 100 °С в зависимости от типа орбиты) и более высоким уровням радиации, чем на Земле. Кроме того, во время запуска компонентам придётся выдерживать различные механические воздействия от вибрации до ударных нагрузок [1].

Ионизирующее излучение является проблемой для электронных компонентов в космосе, поскольку космический аппарат на орбите не защищён магнитным полем и атмосферой Земли. Эффекты, вызванные излучением, можно разделить на эффекты суммарной дозы и одиночные сбои (внезапные сбои и отказы, связанные с воздействием отдельных частиц) [1]. Эффекты суммарной дозы относятся к деградации электронных компонентов из-за накопленной дозы облучения. Деградация приводит к тому, что компоненты отклоняются от заданных рабочих параметров и, возможно, разрушаются. Одиночные сбои происходят, когда ионизирующие частицы проходят через компонент, что может вызывать сбои в его работе. Кроме того, возможны разрушительные короткие замыкания, которые могут быть фатальными.

Одиночные сбои могут либо повредить данные во время выполнения, либо данные, хранящиеся в бортовой памяти в течение длительного времени. Ошибки времени выполнения можно исправить, перезапустив программное обеспечение. Эффекты, вызванные радиацией, можно уменьшить, выбирая компоненты, которые слабо деградируют в условиях радиации, проектируя программное обеспечение таким образом, чтобы оно могло восстанавливаться от одиночных сбоев, ограничивая возможные токи до безопасных уровней и осуществляя коррекцию ошибок. В выключенном состоянии электроника навигационного приёмника поглощает меньшие дозы радиации. Поэтому для навигационных

приемников СМКА характерна прерывистая работа в течении нескольких минут с паузами, которые могут достигать нескольких часов. Такой режим работы также решает вопросы ограниченности энергетики СМКА.

Основное различие между навигационными приёмниками космического класса [3–6] и коммерческими заключается в том, что в то время как навигационные приёмники космического класса намного дороже, они уже разработаны и протестированы для работы в космосе. Для навигационных приёмников некосмического исполнения не регламентированы погрешности измерений, а качество приёмника определяется по положительной полетной истории и в результате его тестирования на Земле и на орбите.

Производители бортовых навигационных приёмников СМКА представляют собственный двоичный протокол (*Binary protocol*), который позволяет изменять конфигурацию модуля под конкретное использование либо получать доступ к дополнительному функционалу, например устанавливать приоритет по работе с навигационными системами, запрещать работу с отдельными спутниками. Также используя этот протокол можно получить доступ к сырым измерениям (необработанным данным, получаемым после антенного блока приёмника) по каждому спутнику для наземной обработки.

При разработке СМКА выбор коммерческих компонентов должен быть обоснован. Это можно сделать с помощью функционального тестирования, тестирования на симуляторах и стендах, механических, термовакуумных, радиационных и др. испытаний, чтобы проверить соответствие коммерческих компонентов требованиям миссии СМКА.

Для СМКА можно определить следующие требования к бортовому навигационному приёмнику: возможность нормальной работы после кратковременного воздействия широкого спектра механических нагрузок; возможность устойчивой работы в жёстких космических условиях (глубокий вакуум, большой перепад температур, высокий уровень радиации); возможность работы при больших относительных скоростях СМКА и навигационных космических аппаратов (НКА) с доплеровским сдвигом частоты порядка ± 40 кГц; возможность оптимизации времени «холодного» старта за счёт предсказания диапазона параметров принимаемых навигационных сигналов для каждого навигационного спутника

в данной точке орбиты; точность решения задачи навигационно-временного определения (НВО) по координатам не должна превосходить 100 м, по скорости – 20 м/с; бортовой компьютер СМКА должен иметь возможность передавать команды на включение/отключение приёмника, принимать и обрабатывать его телеметрию, осуществлять временную синхронизацию бортового времени на основе системного навигационного времени. Кроме того, навигационный приёмник должен иметь низкое энергопотребление (до 1 Вт); возможность подключения к стандартным шинам питания 3,3 и 5 В; наличие таких интерфейсов подключения как *I2C*, *SPI*, *USB*, *UART*; малые размеры и масса как самого приёмника, так и его антенны (возможность её удобного размещения на внешней части корпуса СМКА); электромагнитную совместимость с остальным оборудованием. Программное обеспечение навигационного приёмника должно иметь возможность перепрограммирования прошивки в случае, если эта прошивка повреждается.

Вначале эксплуатации СМКА (в первый месяц полёта) проводят тестирование работоспособности навигационного приёмника. Проверяют его характеристики как при работе по отдельным системам *GPS* или ГЛОНАСС, так и при совместной работе по обеим системам. Управление осуществляется по командной радиолинии, наземный комплекс передаёт на СМКА пакеты команд, содержащие управляющие кадры двоичного протокола для навигационного приёмника. По телеметрической радиолинии от СМКА на наземный комплекс управления передаются пакеты телеметрии, содержащие как решение задачи НВО, так и сырые измерения. На основе начальных данных в формате *TLE* или данных внешнетраекторных измерений СМКА станций слежения рассчитывается вектор состояния на моменты измерений, определяются ошибки в показаниях навигационного приёмника СМКА и анализируется достоверность решений задачи НВО. В течении начального периода работы набирается статистика работы навигационного приёмника СМКА как по отдельным созвездиям *GPS* и ГЛОНАСС, так и при их совместной работе.

Коррекция ошибок в показаниях навигационного приёмника СМКА может быть осуществлена при совместной наземной обработке сырых измерений бортового навигационного приёмника (псевдодалности, псевдоскорости, фазовых

измерений) и высокоточных эфемерид и поправок бортовых часов НКА систем ГЛОНАСС и *GPS*, которые находятся в свободном доступе на сайте Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения». Также коррекцию ошибок в показаниях навигационного приёмника СМКА можно проводить при наличии данных внешнетраекторных измерений станций слежения.

Моделирование задач проектной баллистики сверхмалого космического аппарата

На этапе проектирования СМКА, при выборе элементной базы, архитектуры построения бортовых систем, разработки программы полёта, режимов работы бортовых систем, оценки возможности работы коммерческого навигационного приёмника с ограничением по скорости необходимо решать задачи проектной баллистики. Предварительно прогнозируются орбитальные параметры СМКА и НКА, интервалы радиовидимости всех НКА систем ГЛОНАСС и *GPS* в бортовом навигационном приёмнике СМКА, параметры принимаемых навигационных сигналов для различных частот по каждому видимому НКА. Для решения этих задач в среде *MATLAB* разработано программное обеспечение, которое позволяет решать следующие задачи:

1. Ввод и обработка усреднённых орбитальных данных в формате *TLE* из базы данных *NORAD* по всем НКА систем ГЛОНАСС и *GPS*.

2. Ввод и обработка усреднённых орбитальных данных в формате *TLE* из базы данных *NORAD* или в виде вектора состояния СМКА (при наличии данных внешнетраекторных измерений станций слежения или данных бортового навигационного приёмника).

3. Выбор интервала и шага времени моделирования движения НКА относительно СМКА.

4. Выбор типа моделируемого бортового навигационного приёмника (без ограничений, с ограничением по относительной скорости).

5. Расчёт вектора состояния системы НКА в орбитальной, геоцентрической инерциальной, географической, топоцентрической системах координат на заданном интервале времени моделирования.

6. Расчёт вектора состояния СМКА в орбитальной, геоцентрической инерциальной, географической, топоцентрической системах координат на заданном интервале времени моделирования.

7. Расчёт орбитальных параметров систем НКА относительно СМКА и геометрии взаимного положения. Определение топоцентрических координат систем НКА относительно СМКА: угол места, азимут, наклонная дальность и скорости их изменений.

8. Определение числа НКА в зоне радиовидимости СМКА, интервалов радиовидимости каждого НКА, параметров принимаемых навигационных сигналов для различных частот по каждому видимому НКА.

9. Расчёт оптимального созвездия НКА для решения задачи НВО орбитальных параметров СМКА. Определение моментов времени включения бортового навигационного приёмника СМКА для проведения холодного и горячего старта.

Обсуждение результатов моделирования задач проектной баллистики сверхмалого космического аппарата

На этапе проектирования СМКА БГУ *CubeBel-1* встали вопросы прогнозирования параметров принимаемых навигационных сигналов от каждого НКА для предполагаемой орбиты *CubeBel-1*, оценки возможности прерывистой работы (из-за ограничений по энергопотреблению) и использования коммерческого бортового навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости. Для этого было проведено численное моделирование орбитального движения созвездий НКА систем ГЛОНАСС, *GPS* и СМКА *CubeBel-1* с планируемыми орбитальными данными (высота $H = 500$ км, эксцентриситет $e = 0,001$ и наклонение орбиты $i = 97,4^\circ$). На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования относительного орбитального движения для НКА 25 системы *GPS* и СМКА *CubeBel-1*. Рассчитана динамика изменения доплеровского сдвига частоты, принимаемых навигационных сигналов моделируемого бортового навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости движения за одни сутки. Вычисление доплеровского сдвига проведено для частот $F_1 = 1575,42$ МГц и $F_2 = 1227,60$ МГц.

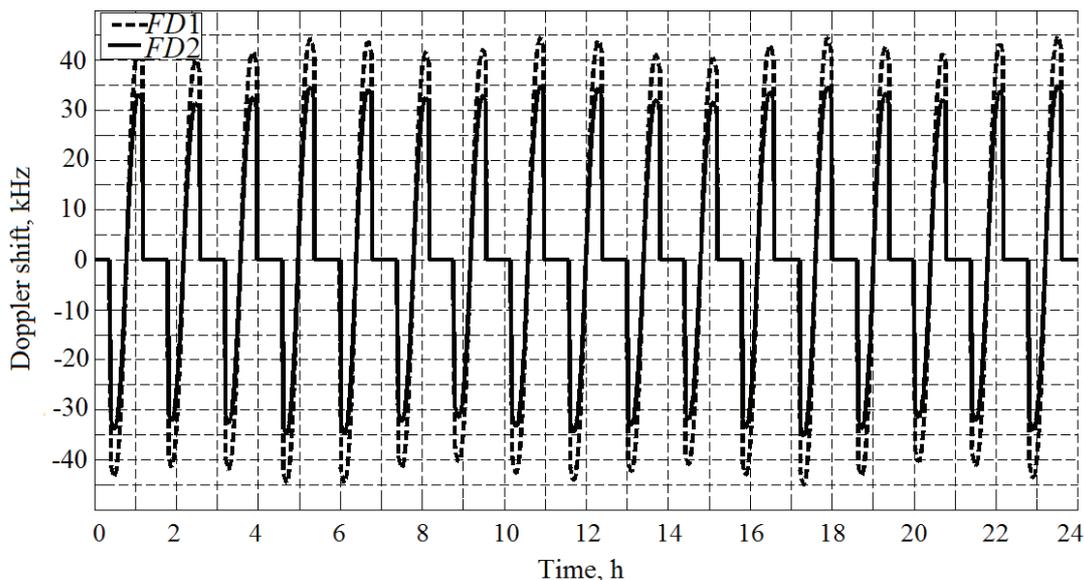


Рисунок 1 – Динамика изменения доплеровского сдвига для GPS 25 и CubeBel-1 за одни сутки

Figure 1 – Dynamics of change of the Doppler shift for GPS 25 and CubeBel-1 for one day

Диапазон изменения доплеровского сдвига на частоте $FD1$ составлял ± 45 кГц, на частоте $FD2$ – $\pm 35,5$ кГц. Интервалы, где значение доплеровского сдвига равно нулю, принимались для случая, когда НКА находился в области земной тени относительно СМКА. Период обращения СМКА составляет 95 мин. При этом, как видно из рисунка 1, НКА находится в зоне радиовидимости в течении 60 мин.

На рисунке 2 представлены расчётные графики интервалов радиовидимости НКА систем

GPS и ГЛОНАСС за 1 ч работы коммерческого бортового навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости СМКА ($V_{\text{отн}} < 500$ м/с). Из анализа рисунка 2 следует, что каждый НКА в бортовом навигационном приёмнике с ограничением виден в течение ≈ 5 мин. В течение часа для НКА системы GPS существуют два интервала времени (28–32 мин и 38–42 мин), в течение которых видно от шести до четырёх спутников при изменении интервала наблюдения от двух до четырёх минут.

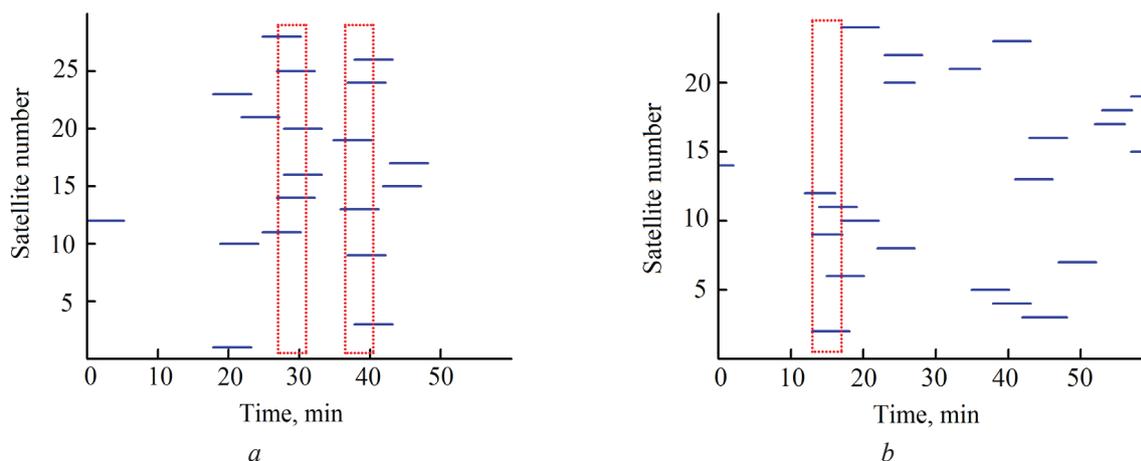


Рисунок 2 – Интервалы радиовидимости навигационного космического аппарата систем GPS (a) и ГЛОНАСС (b) за 1 час работы коммерческого бортового навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости ($V_{\text{отн}} < 500$ м/с)

Figure 2 – Radio-visibility intervals of navigation satellite systems GPS (a) and GLONASS (b) for 1 hour of operation of a commercial onboard navigation receiver with a limitation in relative speed ($V_r < 500$ м/с)

Аналогично для НКА системы ГЛОНАСС существуют только один интервал времени (13–17 мин), в течение которого видно от пяти до двух спутников при изменении интервала наблюдения от двух до четырёх минут. Кроме того, при совместной работе бортового навигационного приёмника по созвездиям НКА систем *GPS* и ГЛОНАСС существуют четыре интервала времени длительностью 4 мин, в течении которых видно 4 и более НКА: интервал 18–22 мин (2 НКА системы ГЛОНАСС и 2 НКА системы *GPS*); интервал 23–27 мин (3 НКА системы ГЛОНАСС и 1 НКА системы *GPS*); интервал 38–42 мин (2 НКА системы ГЛОНАСС и 4 НКА системы *GPS*); интервал 43–47 мин (2 НКА системы ГЛОНАСС и 2 НКА системы *GPS*). Этих интервалов времени достаточно для проведения холодного и тёплого старта коммерческого бортового навигационного приёмника СМКА с ограничением по относительной скорости.

Решения задач баллистики планирования и проведения операций управления сверхмалым космическим аппаратом

В процессе решения задач баллистики планирования и проведения операций управления СМКА на стадии его эксплуатации необходимо решать вопросы по верификации измерительных данных бортового навигационного приёмника с данными моделирования орбитального движения по усреднённым орбитальным параметрам СМКА в формате *TLE* системы *NORAD*. Данные системы *NORAD* получаются путем усреднения большого числа измерений наземных станций слежения системы контроля космического пространства и для СМКА обновляются несколько раз в сутки, что позволяет считать эти данные достоверными и независимыми от измерений навигационного приёмника. Для отработки методов верификации экспериментальных данных навигационного приёмника СМКА БГУ *CubeBel-1*, предварительно проведено исследование работы навигационного приёмника СМКА *Nsight* по данным принимаемой телеметрии от начала его полёта до момента выхода в стабильный режим работы.

На рисунках 3–4 показаны графики ошибки измерения высоты, широты и долготы СМКА *Nsight* с помощью бортового навигационного приёмника по сравнению с расчётными данными, полученными в модели возмущённого движения *SGP* (*Simplified General Perturbations* – упро-

щённая модель общих возмущений), на основе усреднённых орбитальных параметров СМКА в *TLE*-формате за 08.08.2017 г. (рисунок 3) и за период 31.12.2017–06.01.2018 г. (рисунок 4).

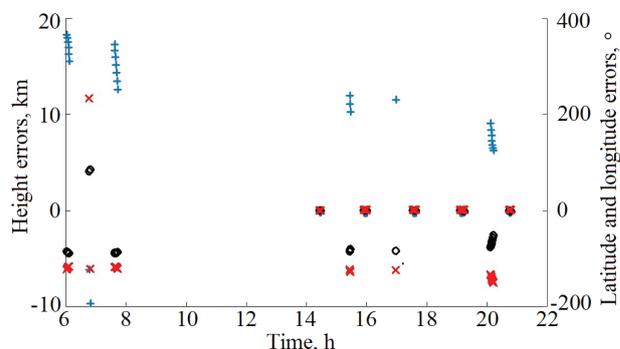


Рисунок 3 – Динамика изменения ошибки измерения высоты (x), широты (o) и долготы (+) сверхмалого космического аппарата *Nsight* с помощью бортового навигационного приёмника по сравнению с расчётными данными за 08.08.2017 г.

Figure 3 – Dynamics of changes in the measurement errors of the height (x), latitude (o) and longitude (+) of the ultrasmall satellite *Nsight* using an onboard navigation receiver as compared to the calculated data for 08.08.2017

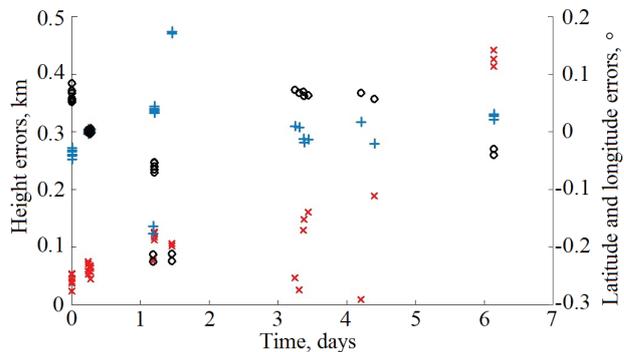


Рисунок 4 – Динамика изменения ошибки измерения высоты (x), широты (o) и долготы (+) сверхмалого космического аппарата *Nsight* с помощью бортового навигационного приёмника по сравнению с расчётными данными за период 31.12.2017–06.01.2018

Figure 4 – Dynamics of changes in the measurement errors of the height (x), latitude (o) and longitude (+) of the ultrasmall satellite *Nsight* using an onboard navigation receiver as compared to the calculated data for the period of 31.12.2017–06.01.2018

Как видно из рисунка 3, в первые три месяца работы бортовой навигационный приёмник СМКА *Nsight* работал нестабильно. Данные телеметрии бортового навигационного приёмника СМКА *Nsight* за 08.08.2016 г. имели существенную ошибку. Навигационный приёмник

программно настраивался и корректировался, работал нестабильно, так как ошибки измерения долготы и широты постоянно «уплывали» и достигали предельных значений 400 и 100° соответственно. После программной корректировки бортового навигационного приёмника ошибка данных телеметрии бортового навигационного приёмника по измерениям долготы и широты за период 31.12.2017–06.01.2018 г., как видно из рисунка 4, по сравнению с расчётными данными, не превышала 0,2° и навигационный приёмник работал стабильно в течении всей недели наблюдения. Максимальные ошибки по высоте уменьшились с 10 км до 400 м.

Заключение

Проанализированы параметры навигационных сигналов GPS и ГЛОНАСС спутников для прогнозируемой орбиты низкоорбитального спутника *CubeBel-1* в течении суток. Численно промоделирована задача холодного старта навигационного приёмника с ограничением по относительной скорости и определены интервалы времени проведения холодного старта для получения альманаха по созвездиям GPS и ГЛОНАСС. Проведена оптимизация работы навигационного приёмника с ограничением по энергопотреблению, определены интервалы включения навигационного приёмника для решения задачи навигационно-временного определения. Для отработки методов верификации экспериментальных данных спутника *CubeBel-1* исследована работа навигационного приёмника спутника *Nsight* по данным принимаемой телеметрии от начала его полёта до момента выхода в стабильный режим работы. Результаты моделирования могут быть использованы при разработке плана полёта сверхмалого космического аппарата с навигационным приёмником.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Информатика, космос и безопасность» (подпрограмма «Информатика и космические исследования»).

Список использованных источников

1. Фортескью, П. Разработка систем космических аппаратов / П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка // Москва: Альпина Паблишер, 2017. – 762 с.

2. Bouwmeester, J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology / J. Bouwmeester, J. Guo // Acta Astronautica. – 2010. – Vol. 67. – P. 854–862.

DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.004

3. Kestilä, A. Aalto-1 nanosatellite – technical description and mission objectives / A. Kestilä [et al.] // Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems. – 2013. – Vol. 2. – P. 121–130.

DOI: 10.5194/gi-2-121-2013

4. Scholz, A. Flight results of the COMPASS-1 picosatellite mission / A. Scholz [et al.] // Acta Astronautica. – 2010. – Vol. 67. – P. 1289–1298.

DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.040

5. Jochim, E.F. GPS Based Onboard and Onground Orbit Operations for Small Satellites / E.F. Jochim [et al.] // Acta Astronautica. – 1996. – Vol. 39, no. 9–12. – P. 917–922. DOI: 10.1016/S0094-5765(97)00077-5

6. Gill, E. The BIRD Satellite Mission as a Milestone Towards GPS-based Autonomous Navigation / E. Gill, O. Montenbruck, H. Kayal // Navigation - Journal of the Institute of Navigation. – 2001. – Vol. 48, no. 2. – P. 69–75. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2001.tb00229.x

7. Rush, J. Current issues in the use of the Global Positioning System aboard satellites / J. Rush // Acta Astronautica. – 2000. – Vol. 47, no. 2–9. – P. 377–387. DOI: 10.1016/S0094-5765(00)00079-5

8. Перов, А.И. Глонасс. Принципы построения и функционирования / А.И. Перов, В.Н. Харисов // Москва: Издательство «Радиотехника», 2010. – 800 с.

9. Куницин, В.Е. Радиотомография ионосферы / В.Е. Куницин, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева // М.: Физматлит, 2007. – 336 с.

10. Куницин, В.Е. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы / В.Е. Куницин, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 548–553.

11. Wang, R. Propagation errors analysis of TLE data / R. Wang, J. Liu, Q. Zhang // Advances in Space Research. – 2009. – Vol. 43, no. 7. – P. 1065–1069.

DOI: 10.1016/j.asr.2008.11.017

12. Ali, I. Doppler characterization for LEO satellites / I. Ali, N. Al-Dhahir, J.E. Hershey // IEEE Transactions on Comm. – 1998. – Vol. 46, no. 3. – P. 309–313. DOI: 10.1109/26.662636

13. Borio, D. Impact of GPS acquisition strategy on decision probabilities / D. Borio, L. Camoriano, L. Presti // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2008. – Vol. 44, no. 3. – P. 996–1011.

DOI: 10.1109/TAES.2008.4655359

14. Kovář, P. Cold Start Strategy of the CubeSat GPS / P. Kovář, S. Jelen // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2014. – Vol. 14, no. 2. – P. 29–34. DOI: 10.4316/AECE.2014.02005

Acknowledgments

The work was performed as part of the implementation of the State program of scientific research of the Republic of Belarus "Informatics, space and security" (Program "Informatics and space research").

References

1. Fortescue P., Stark J., Swinerd G. *Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft Systems Engineering]. Moscow, Alpina Publisher, 2017, 762 p.
2. Bouwmeester J., Guo J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 854–862.
DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.004
3. Kestilä A., Tikka T., Peitso P., Rantanen J., Nääsilä A., Nordling K., Saari H., Vainio R., Janhunen P., Praks J., Hallikainen M. Aalto-1 nanosatellite – technical description and mission objectives. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2013, vol. 2, pp. 121–130.
DOI: 10.5194/gi-2-121-2013
4. Scholz A., Ley W., Dachwald B., Miao J.J., Juang J.C. Flight results of the COMPASS-1 picosatellite mission. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, pp. 1289–1298.
DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.06.040
5. Jochim E.F., Gill E., Montenbruck O., Kirschner M. GPS Based Onboard and Onground Orbit Operations for Small Satellites. *Acta Astronautica*, 1996, vol. 39, no. 9–12, pp. 917–922.
DOI: 10.1016/S0094-5765(97)00077-5
6. Gill E., Montenbruck O., Kayal H. The BIRD Satellite Mission as a Milestone Towards GPS-based Autonomous Navigation. *Navigation*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 69–75. **DOI:** 10.1002/j.2161-4296.2001.tb00229.x
7. Rush J. Current issues in the use of the Global Positioning System aboard satellites. *Acta Astronautica*, 2000, vol. 47, no. 2–9, pp. 377–387.
DOI: 10.1016/S0094-5765(00)00079-5
8. Perov A.I., Kharisov V.N. *Glouass. Printsipy postroeniya i funkcionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and operation]. Moscow, Publishing house Radiotekhnika, 2010, 800 p.
9. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionospheric radiotomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 336 p.
10. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S., Nesterov I.A. [Satellite radiosounding and ionospheric radiotomography]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2010, vol. 180, no. 5, pp. 548–553 (in Russian).
11. Wang R., Liu J., Zhang Q. Propagation errors analysis of TLE data. *Advances in Space Research*, 2009, vol. 43, no. 7, pp. 1065–1069.
DOI: 10.1016/j.asr.2008.11.017
12. Ali I., Al-Dhahir N., Hershey J.E. Doppler characterization for LEO satellites. *IEEE Transactions on Comm.*, 1998, vol. 46, no. 3, pp. 309–313.
DOI: 10.1109/26.662636
13. Borio D., Camoriano L., Presti L. Impact of GPS acquisition strategy on decision probabilities. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 996–1011.
DOI: 10.1109/TAES.2008.4655359
14. Kovář P., Jelen S. Cold Start Strategy of the CubeSat GPS. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 29–34.
DOI: 10.4316/AECE.2014.02005

УДК 614.842.435

Новые функциональные возможности пожарных извещателей для жилых и промышленных помещений

В.О. Китиков¹, Е.В. Тернов¹, А.В. Даниленко¹, Н.И. Мухуров², С.В. Денисюк²

¹Институт жилищно-коммунального хозяйства Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси,
пр-т Независимости, 68, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 08.08.2019

Принята к печати 11.11.2019

Актуальность раннего обнаружения признаков пожара вполне очевидна, поскольку в результате принятия необходимых мер по эвакуации людей и материальных ценностей, обесточиванию электрооборудования и тушению пожара в момент начала возгорания либо пассивного тления можно полностью избежать человеческих жертв и сократить экономические потери до минимума.

Приведено графическое представление классификации пожарных извещателей в виде обобщённой схемы с использованием всех основных классификационных признаков, их достоинства и недостатки. Определены оптимальные области использования извещателей в зависимости от пожарной нагрузки. Показана эффективность применения комбинированных пожарных извещателей, оснащённых помимо традиционных дымовых и тепловых датчиков газовыми сенсорами, как комплексного подхода к организации осуществления контроля над охраняемыми объектами.

Приведены результаты разработки высокочувствительного двухзонного сенсора с чувствительными элементами на основе плёнок оксида железа для детектирования выделения взрывоопасных и отравляющих газов в начальной стадии тления до образования условий воспламенения. Применение газовых сенсоров, реагирующих на опасные газы в окружающей среде, существенно снижает риск гибели людей от отравления угарным газом.

Ключевые слова: системы пожарной безопасности, сигнализации, эксплуатации помещений, раннее обнаружение пожаров, газовые сенсоры.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

Адрес для переписки:

А.В. Даниленко
Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, к. 526,
Минск 220141, Беларусь,
e-mail: stray@newman.bas-net.by

Address for correspondence:

A.V. Danilenko
Institute of the Housing and Communal Services of the National
Academy of Sciences of Belarus,
Akademika Kuprevicha str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: stray@newman.bas-net.by

Для цитирования:

В.О. Китиков, Е.В. Тернов, А.В. Даниленко, Н.И. Мухуров,
С.В. Денисюк.
Новые функциональные возможности пожарных извещателей
для жилых и промышленных помещений.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 341–352.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

For citation:

V.O. Kitikov, E.V. Ternov, A.V. Danilenko, N.I. Mukhurov,
S.V. Denisyuk.
[New Functional Possibilities of fire Detectors for Residential
and Industrial Rooms].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 341–352 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

New Functional Possibilities of Fire Detectors for Residential and Industrial Rooms

V.O. Kitikov¹, E.V. Ternov¹, A.V. Danilenko¹, N.I. Mukhurov², S.V. Denisyuk²

¹*Institute of the Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus, Akademika Kuprevicha str., 10, Minsk 220141, Belarus*

²*State Scientific and Production Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology» of the National Academy of Sciences of Belarus, Nezavisimosty Ave., 68, Minsk 220072, Belarus*

Received 08.08.2019

Accepted for publication 11.11.2019

Abstract

The relevance of early detection of fire signs is quite obvious because due to the necessary measures for evacuating of people and material values, disconnecting the electrical equipment and extinguishing the fire at the time of the onset of fire or passive smoldering, human casualties can be completely avoided and economic losses can be minimized.

A graphical representation of fire detectors' the classification in the form of a generalized scheme using all the main classification features, their advantages and disadvantages is given. The optimal areas for the use of detectors depending on the fire load are determined. The effectiveness of combined fire detectors' use, equipped in addition to traditional smoke and heat sensors with gas sensors, as an integrated approach to the organization of control over protected objects is shown.

The results of development of highly sensitive two-zone sensor with sensitive elements based on iron oxide films for detecting the release of explosive and poisonous gases in the initial stage of decay before the formation of ignition conditions are presented. The use of gas sensors that respond to hazardous gases in the environment significantly reduces the risk of death due to carbon monoxide poisoning.

Keywords: fire safety systems, alarm systems, premises systems, early detection of fires, gas sensors.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

Адрес для переписки:

А.В. Даниленко
Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, к. 526,
Минск 220141, Беларусь,
e-mail: stray@newman.bas-net.by

Address for correspondence:

A.V. Danilenko
Institute of the Housing and Communal Services of the National
Academy of Sciences of Belarus,
Akademika Kuprevicha str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: stray@newman.bas-net.by

Для цитирования:

В.О. Китиков, Е.В. Тернов, А.В. Даниленко, Н.И. Мухуров,
С.В. Денисюк.
Новые функциональные возможности пожарных извещателей
для жилых и промышленных помещений.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 341–352.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

For citation:

V.O. Kitikov, E.V. Ternov, A.V. Danilenko, N.I. Mukhurov,
S.V. Denisyuk.
[New Functional Possibilities of fire Detectors for Residential
and Industrial Rooms].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 341–352 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-341-352

Введение

Развитие и совершенствование систем пожарной сигнализации на современном этапе связано с применением инновационных изделий микроэлектроники, позволяющих расширить функции и повысить эффективность современных систем обнаружения очагов возгорания с целью снижения риска нанесения ущерба здоровью людей и материальным ценностям [1, 2]. Традиционные противопожарные системы фактически достигли предела своих функциональных возможностей. Современные технологии позволяют создавать противопожарные системы принципиально новых качества, надёжности и безопасности, недостижимых в существующих системах, и фактически открывают новое направление в конструировании таких систем. Сравнительные испытания пожарных извещателей (ПИ) с использованием новых технологий во ВНИИПО МЧС России в мае 2015 года подтвердили их преимущество над классическими ПИ в части времени обнаружения пожаров при всех нормируемых типах возгораний ТП2–ТП5 [3]. В связи с этим перед разработчиками систем пожарной сигнализации стоит актуальная задача модернизации существующих и создания новых систем и средств, в частности, пожарных извещателей на основе датчиков раннего обнаружения признаков начальной стадии тления, позволяющих обеспечить своевременное принятие мер по эвакуации людей и ликвидации возможного очага возгорания, а также снизить вероятность ложных срабатываний [4]. В целях создания условий конкурентоспособности новых датчиков на рынке систем безопасности требуется оценить перспективы их применения в существующих системах пожарной сигнализации. Это в свою очередь требует разработки системы классификации первичных устройств обнаружения – пожарных извещателей, в которые предполагается встраивать датчики раннего обнаружения признаков выделения в окружающую среду опасных для человека газовых компонентов и потенциальных очагов возможного пожара.

Классификационные признаки пожарных извещателей

Применяемые в современных системах пожарной сигнализации пожарные извещатели

можно классифицировать по следующим основным признакам¹:

- 1) способу приведения в действие;
- 2) возможности многократного использования;
- 3) возможности определения местоположения извещателя;
- 4) способу передачи сигнала;
- 5) виду контролируемого признака пожара, конфигурации измерительной зоны и принципу действия;
- 6) характеру реакции на контролируемый признак пожара.

В рамках указанной выше классификации пожарных извещателей существует более детальная их классификация, представленная на рисунке 1.

По возможности определения местоположения ПИ разделяются на неадресные и адресные. Неадресные ПИ не содержат модулей со встроенным кодом местоположения и при срабатывании извещают только о факте возникновения пожара, без указания на расположение очага возгорания. Адресные ПИ совместно с сигналом о возникновении пожара передают на приёмно-контрольный прибор уникальный адресный код, по которому система пожаробнаружения автоматически без предварительной настройки определяет местонахождение очага возгорания, что является исходными данными для организации эвакуации и приведения в действие средств пожаротушения.

По способу передачи сигнала ПИ разделяются на четыре основных вида:

- включённые в шлейф, извещатели передающие сигнал посредством пожарного шлейфа. При этом электропитание встраиваемых в шлейф ПИ осуществляется от сигнальных проводов: у двухпроводных по контролируемому шлейфу с задействованием одной пары проводов, у четырёхпроводных по дополнительной паре проводов;
- радиоканальные ПИ, как следует из названия, передают сигнал при помощи встроенного радиомодуля;
- оптоволоконные ПИ – тип извещателей, которые задействуют для передачи сигнала волоконно-оптические линии связи;
- автономные ПИ – приборы обнаружения со встроенным модулем оповещения, при срабатывании издают интенсивный продолжительный звуковой сигнал. Не требуют подключения к пульту.

¹Система стандартов пожарной безопасности. Системы пожарной сигнализации. Общие требования. СТБ 11.16.01-98. – Введ. 01.10.98. – Мн. БелГИСС – 2011. – 12 с.

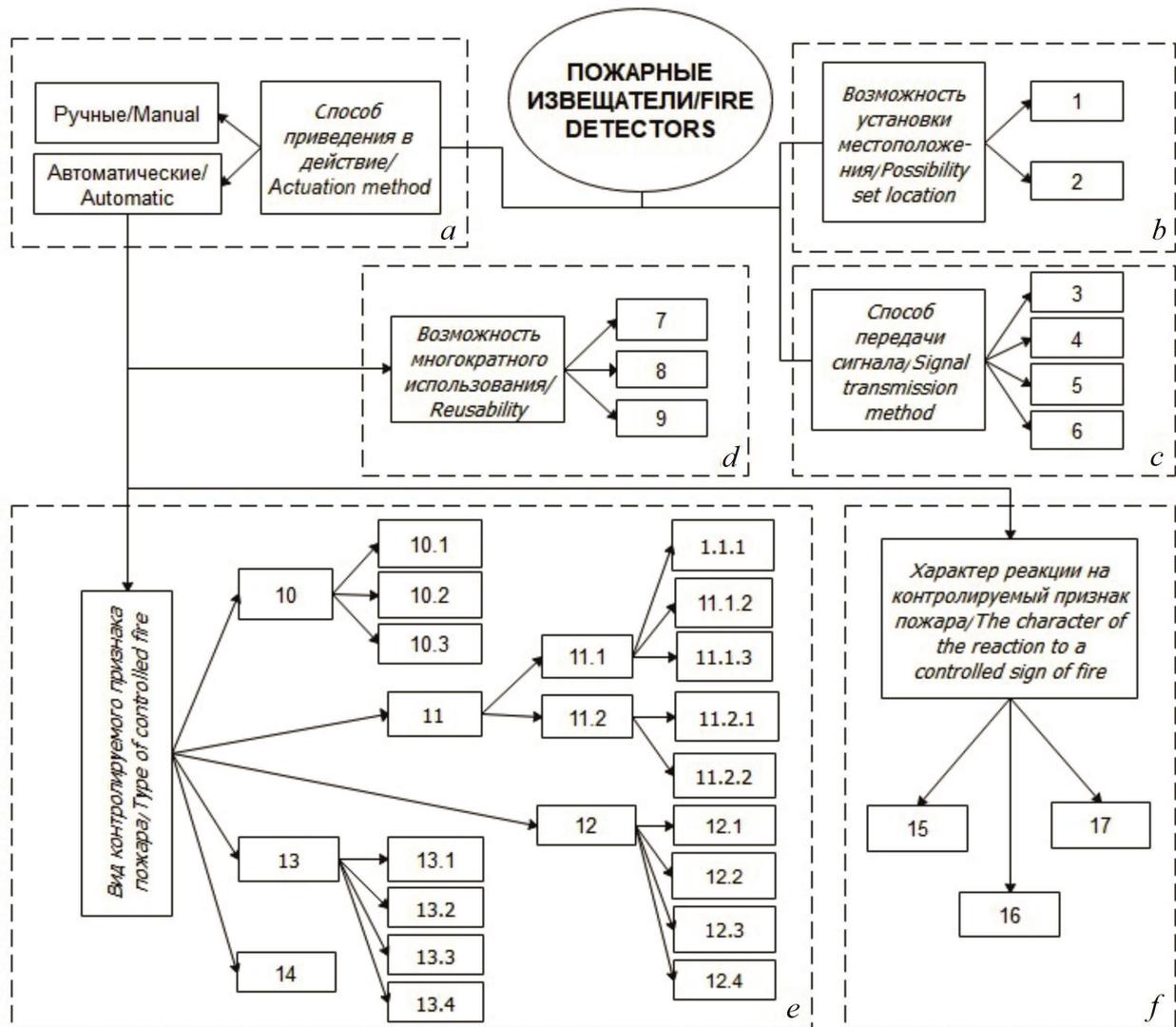


Рисунок 1 – Обобщённая схема классификации пожарных извещателей: *a* – по способу приведения в действие: ручные; автоматические; *b* – по возможности установки местоположения: 1 – адресные, 2 – неадресные; *c* – по способу передачи сигнала: 3 – включенные в шлейф, 4 – радиоканальные, 5 – оптоволоконные, 6 – автономные; *d* – по возможности многократного использования: 7 – одноразовые, 8 – многоразовые, 9 – с заменяемым активным элементом; *e* – по виду контролируемого признака пожара: 10 – тепловые: 10.1 – точечные, 10.2 – многоточечные, 10.3 – линейные; 11 – дымовые: 11.1 – оптические: 11.1.1 – точечные, 11.1.2 – линейные, 11.1.3 – аспирационные; 11.2 – ионизационные: 11.2.1 – радиоизотопные, 11.2.2 – электроиндукционные; 12 – пламени: 12.1 – ультрафиолетовые, 12.2 – инфракрасные, 12.3 – видимого спектра, 12.4 – многодиапазонные; 13 – газовые: 13.1 – полупроводниковые, 13.2 – электрохимические, 13.3 – термохимические, 13.4 – металлооксидные; 14 – комбинированные; *f* – по характеру реакции на контролируемый признак пожара: 15 – максимальные, 16 – дифференциальные, 17 – максимально-дифференциальные

Figure 1 – Generalized classification scheme of fire detectors: *a* – according to the method of activation: manual, automatic; *b* – possibility of set location: 1 – addressed, 2 – non-addressed; *c* – by the method of signal transmission: 3 – included in the loop, 4 – radio channel, 5 – fiber, 6 – autonomous; *d* – possibility of multiple use: 7 – disposable; 8 – reusable; 9 – with replaceable active element; *e* – by type of controlled fire sign: 10 – thermal: 10.1 – point, 10.2 – multipoint, 10.3 – linear; 11 – smoke: 11.1 – optical: 11.1.1 – point, 11.1.2 – linear, 11.1.3 – aspiration; 11.2 – ionization; 11.2.1 – radioisotope, 11.2.2 – electric induction; 12 – flame: 12.1 – ultraviolet, 12.2 – infrared, 12.3 – in visible spectrum, 12.4 – multirange; 13 – gas: 13.1 – semiconductor, 13.2 – electrochemical, 13.3 – thermochemical, 13.4 – metal oxide; 14 – combined; *f* – by the nature of reaction to the controlled fire sign: 15 – maximal, 16 – differential, 17 – maximal-differential

Все виды ПИ, кроме включённых в шлейф, питаются от автономного сменного элемента, не будучи связанными с сигнальными цепями.

По виду контролируемого признака пожара ПИ разделяются в основном на тепловые, дымовые, пламени и газовые [5–7]. Относятся к автоматическим ПИ. Дополнительно классифицируются по конфигурации измерительной зоны и принципу действия.

По характеру реакции на контролируемый признак пожара ПИ разделяются на максимальные, дифференциальные и максимально-дифференциальные:

– максимальные – извещатели, формирующие извещение о пожаре при превышении установленного порогового значения контролируемого параметра;

– дифференциальные – извещатели, формирующие извещение о пожаре при превышении

определённого значения скорости изменения величины контролируемого параметра;

– максимально-дифференциальные – извещатели, включающие оба канала максимальный и дифференциальный, включённые по логической схеме «ИЛИ».

Наиболее ранними по времени появления и массово используемыми в системах пожарной сигнализации являются тепловые ПИ. Реагируют на избыток теплоты в подпотолочном пространстве охраняемого помещения. Нечувствительны к влажности, запыленности и загазованности воздуха, а также к любым видам ионизирующих и электромагнитных излучений; отличаются невысокой стоимостью. Типовой тепловой ПИ² реагирует на повышение температуры в диапазоне значений от +54 до +70 °С. По конфигурации измерительной зоны ПИ подразделяются на точечные, многоточечные и линейные (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1

Классификация пожарных извещателей по конфигурации измерительной зоны

Classification of fire detectors on the base of the measuring zone configuration

Точечные Point	Многоточечные Multipoint	Линейные Linear
Контроль признаков пожара в зоне, ограниченной радиусом действия извещателя	Контроль признаков пожара в нескольких компактных зонах, распределенных в пространстве	Контроль признаков пожара в любом месте на протяжении сигнального кабеля
Fire sign monitoring in the zone limited by the detector range	Fire sign monitoring in several compact zones distributed in space	Fire sign monitoring anywhere along the signal cable

Дымовые ПИ реагируют на присутствие копоти и дыма в воздухе охраняемого помещения. Благодаря сокращенному по сравнению с тепловыми ПИ времени обнаружения очагов возгорания позволяют повысить безопасность эвакуации людей из здания, а также ускорить срабатывание стационарных систем пожаротушения. Преимущественно применяются в жилых и общественных помещениях с преобладанием в интерьере органических материалов, выделяющих при горении большое количество дыма. По принципу действия делятся на оптические и ионизационные (таблица 2).

Оптические дымовые ПИ содержат оптический датчик, реагирующий на изменение прозрачности воздуха в охраняемом помещении вследствие присутствия продуктов горения и тления. По конфигурации измерительной зоны делятся

на точечные, линейные (таблица 1) и аспирационные. Указанные типы оптических дымовых ПИ отличаются следующими особенностями взаимного расположения излучателя и фотоприёмника, входящих в состав оптического датчика:

– точечные – излучатель и фотоприёмник компактно размещаются в корпусе измерительной камеры;

– линейные – излучатель и фотоприёмник взаимно удалены в пределах измерительной зоны либо объединены в одном корпусе с использованием отражающего элемента, что позволяет охватить измерительную зону протяжённостью свыше 100 м;

²Паспорт БИРЮ 01.363.00.000-03 ПС, Минск 2011. ОАО «Завод Спецавтоматика». Извещатель пожарный тепловой максимальный ИП109-05-А2М

– аспирационные – подобно точечным излучателем и фотоприёмником компактно размещаются в корпусе измерительной камеры, воздух в которую посредством трубопроводов принудительно подаётся из одной или нескольких точек охраняемой зоны; это позволяет охватить измерительную зону протяжённостью в сотни метров и при использовании фильтров воздуха обеспечить контроль признаков возникновения пожара в запыленной среде.

Таблица 2 / Table 2

Классификация дымовых пожарных извещателей по принципу действия

Classification of smoke detectors on the principle of operation

Оптические Optical	Ионизационные Ionization
Реагируют на продукты горения, способные воздействовать на поглощающую или рассеивающую способность излучения в инфракрасном, ультрафиолетовом или оптическом диапазоне Respond to combustion products capable of affecting the absorbing or scattering ability of radiation in the infrared, ultraviolet or optical range	Реагируют на изменения ионизационного тока или объемного электрического заряда воздуха внутри измерительной камеры под воздействием продуктов горения Respond to changes in the ionization current or volumetric electric charge of air inside the measuring chamber under the influence of combustion products

Ионизационные дымовые ПИ в свою очередь бывают радиоизотопные и электроиндукционные. Радиоизотопные реагируют на уменьшение ионизационного тока, образуемого специальным низкорadioактивным веществом внутри измерительной камеры, вызванное наличием в воздухе дыма, особенно чёрного. Электроиндукционные реагируют на концентрацию заряженных частиц в воздухе контролируемого помещения, принудительно нагнетаемом в измерительную камеру посредством воздуховода.

ПИ пламени по области спектра электромагнитного излучения, воспринимаемого чувствительным элементом, разделяются на инфракрасные, видимого спектра, ультрафиолетовые и многодиапазонные. Датчики ПИ пламени срабатывают на появление открытого огня. Предназначены для обнаружения признаков возгорания на производственных и складских объектах, связанных с добычей, транспортировкой, переработкой и хранением материалов и сырья, горение которых сопровождается появлением открытого огня без стадии тления. В отличие от тепловых и дымовых ПИ могут применяться как в помещениях, так и под открытым небом.

Газовые ПИ реагируют на изменения химического состава воздуха под воздействием пожара – концентрации одного или нескольких основных газов (таблица 3).

Таблица 3 / Table 3

Основные виды газов, выделяющихся при горении

Main types of gases released during combustion

Наименование газа Gas name	Химическая формула Chemical formula	Причина выделения Reason for allocation
Угарный газ Carbon monoxide	CO	Термическое разложение (пиролиз) органических материалов при температуре 750–800 °C Thermal decomposition (pyrolysis) of organic materials at a temperature of 750–800 °C
Водород Hydrogen	H	
Метан Methane	CH ₄	
Углекислый газ Carbon dioxide	CO ₂	Переход пожара из тления в пламенную стадию The transition of fire from decay to the flame stage
Летучие ароматические углеводороды Volatile aromatic hydrocarbons	C _x H _y	Горение нефти, газа и продуктов их переработки Combustion of oil, gas and products of their processing

По типу чувствительного элемента (сенсора) газовые ПИ преимущественно разделяются на полупроводниковые и электрохимические. Действие полупроводниковых сенсоров основано на изменении проводимости полупроводникового чувствительного слоя. Характеризуются малыми размерами, высокой чувствительностью и надёжностью, низкой стоимостью, имеют достаточно большой срок службы, однако вместе

с тем отличаются повышенным энергопотреблением и низкой селективностью. Действие электрохимических газовых ПИ основано на отличиях процессов электрохимического окисления пожарных газов на рабочем электроде электролитической ячейки, характеризующихся электрохимическими процессами в объёме и на поверхности. Основные параметры электрохимических сенсоров приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Сравнительные качественные характеристики электрохимических сенсоров Comparative quality characteristics of electrochemical sensors

Параметр Parameter	Характер протекания окислительной реакции The nature of the oxidative reaction	
	Электрохимия объёма Electrochemistry of volume	Электрохимия поверхности Surface electrochemistry
Вид рабочей характеристики Type of performance	Линейная Linear	Логарифмическая Logarithmic
Время отклика и восстановления Response and Recovery Time	Быстрое Fast	Очень быстрое Very fast
Селективность Selectivity	Хорошая Good	Слабая Weak
Влияние влаги Moisture effect	Отсутствует Missing	Незначительное Insignificant
Механическая стойкость Mechanical resistance	Хорошая Good	Хорошая Good
Потребляемая мощность Power consumption	Отсутствует Missing	Незначительная Insignificant

Как видно из таблицы 4, объёмная электрохимическая окислительная реакция (на электродах, помещённых в электролит) по сравнению с поверхностной (на поверхности материала, чаще всего металлооксидного полупроводника) обеспечивает лучшие рабочие характеристики сенсора газового ПИ. Вместе с тем металлооксидные сенсоры за счёт отсутствия непрекращающейся химической реакции имеют более продолжительные сроки хранения и службы, способны работать при более высоких температурах.

Сенсоры газовых ПИ реагируют на предельно малую концентрацию пожарных газов в воздухе на начальном этапе возможного возникновения пожара – тлении [8–10]. Потенциально они способны предупредить возможный пожар до появления в окружающей среде дыма и пламени. Тем не менее, с учетом «не идеальности» их рабочих характеристик, низкой селективности, повышенной возможности «ложных» срабатываний, целесообразно

применять газовые ПИ совместно с проверенными, сертифицированными дымовыми и тепловыми. Ввиду того, что газовые сенсоры способны избирательно реагировать на отдельные газы, присутствие которых в воздушной среде контролируемой зоны однозначно указывает на возможности повышения концентрации отравляющих и взрывоопасных газов до опасных для человека пределов и возникновения очага пожара, их разработка представляется перспективной и актуальной.

Современный технический уровень газовых пожарных извещателей

В настоящее время полупроводниковые газовые сенсоры широко используются для анализа газов [11, 12]. Изменение электросопротивления полупроводникового газочувствительного слоя при химической адсорбции на его поверхности газов позволяет эффективно использовать

полупроводниковые газовые сенсоры в приборах противопожарной сигнализации, а также в сигнализаторах опасных для человека концентраций токсичных газов.

Водород является основным компонентом выделяемых газов на стадии тления в результате пиролиза материалов, используемых в строительстве, таких как древесина, текстиль, синтетические материалы [13]. На начальной стадии возможного возникновения пожара, в процессе тления концентрация водорода составляет 10–20 ppm. В дальнейшем происходит нарастание содержания ароматических углеводородов на фоне присутствия монооксида углерода (СО) в пределах 20–80 ppm.

Экспериментальные результаты показали, что порог обнаружения системы раннего предупреждения повышения концентрации большинства газов, в том числе взрывоопасных (водорода) и отравляющих (угарного газа), до опасных для человека пределов и возможности возникновения очага пожара, составляют не более 20 ppm в атмосферном воздухе при нормальных условиях. При этом быстроедействие такой системы не должно быть более 10 с. Для разработок эффективных пожарных газовых анализаторов эти условия должны рассматриваться как основополагающие [14]. Принципиальными представляются и такие характеристики, как высокие селективность, чувствительность, быстроедействие и относительная дешевизна полупроводниковых газовых датчиков. В совокупности такие достоинства позволяют значительно расширить возможности стандартных пожарных извещателей как для жилых, так и промышленных помещений.

Для обеспечения требуемого быстрогодействия в несколько секунд за счет физико-химических процессов на поверхности чувствительного слоя сенсор периодически разогревают до температуры 450–500 °С, что активирует его поверхность [14]. В качестве чувствительных полупроводниковых слоёв могут быть использованы плёнки оксидов металлов (SnO_2 , ZnO и др., легированных Pt, Pd и др.) с развитой удельной поверхностью. Нагреватели выполняются в виде тонких полосок резистивного слоя инертных материалов (Pt, Au и др.), электрически изолированных от полупроводникового чувствительного слоя. В качестве подложки используется поликристаллический оксид алюминия, на неё с двух сторон наносятся нагреватель и металлооксид-

ный газочувствительный слой. Чувствительный элемент помещается в корпус, защищённый проницаемой для газа мембраной, удовлетворяющей требованиям взрывопожаробезопасности.

Сенсоры с такими материалами чувствительных слоёв могут предназначаться для определения концентраций горючих газов (метан, пропан, бутан, водород и др.) в воздухе в интервале концентраций от 0,001 % до единиц процентов, а также токсичных газов (СО, арсин, фосфин, сероводород и др.) при концентрациях на уровне ПДК. Сенсоры могут применяться в сигнализаторах утечки газов и системах противопожарной сигнализации [15].

Более высокая точность измерения концентрации монооксида углерода СО – угарного газа, представляющего невидимую опасность для жизни человека, достигнута в электрохимических сенсорах, использующих платиновый элемент для усиления реакции между молекулами СО и кислорода в окружающем воздухе. Указанные сенсоры имеют линейную характеристику и низкий ток потребления [16]. По характеру реакции на контролируемый признак пожара электрохимические сенсоры являются дифференциальными (рисунок 1) и предназначены для качественного и количественного анализа химических соединений в жидких и газообразных средах, что в совокупности позволяет отследить динамику изменения микроклимата охраняемого объекта [17].

По своим механическим характеристикам сенсоры газовых ПИ, в частности СО, допускают их размещение в существующих корпусах комбинированных ПИ, объединяющих в себе тепловой и дымовой датчик (рисунок 2). Приведённый на рисунке автоматический пожарный извещатель *Bosch Sicherheitssysteme GmbH* серии 420 оснащён оптическим, тепловым и химическим сенсорами и собственным микропроцессором³. Использование комбинации трёх различных каналов обнаружения с задействованием технологии интеллектуальной обработки сигнала обеспечивает высокий уровень обнаружения возгорания. Применяемые в извещателях серии 420 сенсоры отличаются следующими особенностями.

³ Автоматические пожарные извещатели серии 420. Режим доступа: <https://docplayer.ru/44085850-Avtomaticheskie-pozharnye-izveshchateli-serii-420-intellektualnoe-obnaruzhenie-prevoshodnaya-zashchita.html>. – Дата доступа: 19.09.2018

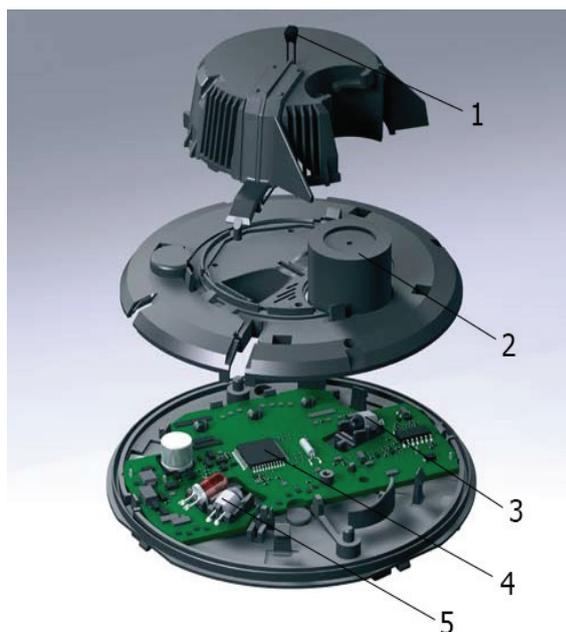


Рисунок 2 – Общий вид одного из вариантов комбинированного пожарного извещателя: 1 – тепловой сенсор; 2 – химический сенсор; 3, 4 – фотодиоды; 5 – светодиоды

Figure 2 – General view of the combined fire detector: 1 – thermal sensor; 2 – chemical sensor; 3, 4 – photodiodes; 5 – light-emitting diodes

Тепловой сенсор. Реагирует на превышение порога максимальной температуры срабатывания в + 54 °С или в + 69 °С (тепловой максимальный) или на её рост на определённое количество градусов за определённый период времени (тепловой дифференциальный).

Оптический сенсор. Реагирует на попадание в измерительную камеру частиц дыма, которые рассеивают свет, исходящий от светодиода. В работе оптического сенсора применяется принцип измерения рассеянного света. В двойном оптическом сенсоре по технологии *Dual Ray* используются два светодиода, излучающих свет разной длины волны – инфракрасный и синий – для определения плотности дыма и размера частиц путём сравнения интенсивности рассеянного света, благодаря чему обеспечивается надёжное и быстрое обнаружение даже малой концентрации дыма (обнаружение ТП1 и ТП9).

Химический сенсор. Обнаруживает монооксид углерода (CO), водород (H₂) и монооксид азота (NO). Значение сигнала сенсора пропорционально концентрации газа. Данные, полученные с химического сенсора, предоставляют дополни-

тельную информацию для эффективного слежения и предотвращения негативных последствий внешних воздействий. Срок службы химического сенсора ограничен и составляет 6 лет работы, по истечении этого срока он автоматически отключается. После этого извещатель продолжает работу как комбинированный извещатель с двойными оптическим и тепловым сенсорами.

Благодаря объединению сенсоров разных типов в одном комбинированном извещателе появляется возможность его использования в местах, где выполняемые работы могут являться источником низких концентраций относительно прозрачных дыма, пара или пыли, а также в местах, где разрешено курение. Не представляет большой технической проблемы встраивание газового сенсора также и в корпус автономного дымового пожарного извещателя для массового применения в индивидуальном жилом секторе, где вероятность появления угарного и других опасных газов достаточно велика.

В отличие от полупроводниковых электрохимические сенсоры газовых ПИ не требуют нагрева и имеют низкий ток потребления. Это позволяет подключать их к адресно-аналоговым ПИ, питаемым по шлейфу, а при необходимости использовать в составе автономных ПИ либо в ПИ с радиоканальной или оптоволоконной передачей данных (рисунок 1). Для сравнения, полупроводниковые металлооксидные газовые сенсоры на основе диоксида олова SnO₂ или диоксида рутения RuO₂ требуют нагрева чувствительного элемента до температуры 250 °С. При этом для снижения тока потребления используется импульсный нагрев с частотой 1 Гц, а величина потребляемого тока в дежурном режиме составляет десятки миллиампер. Это налагает ограничение, с одной стороны, на число полупроводниковых газовых сенсоров в системе, а с другой стороны – на возможности применения полупроводниковых газовых сенсоров во взрывоопасных зонах. Срок службы электрохимических газовых сенсоров, ранее составлявший 2–3 года, в настоящее время увеличен до 5, а у отдельных производителей до 10 лет.

В настоящее время ведётся разработка высокочувствительного двухзонного сенсора для детектирования выделения взрывоопасных и отравляющих газов в начальной стадии тления до образования условий воспламенения дополнительно к существующим системам пожарной

безопасности. Идея конструкции такого сенсора предложена в [17] и реализована на макетном образце, изображенном на рисунке 3. Газочувствительные свойства сенсоров с чувствительными элементами на основе пленок оксида железа изучены в интервале температур от 20 до 500 °С в поверочных газовых смесях, содержащих водород и метан в концентрациях 0,8 и 1,0 об. %, соответственно, что значительно ниже взрывоопасных: 4,0 об. % для H_2 и 4,4 об. % для CH_4 [18]. Определены оптимальные рабочие температуры для детектирования метана (190 °С) и водорода (60 °С). Показана перспективность конструктивного варианта построения газовых сенсоров на микропрофилированных подложках анодного оксида алюминия, содержащих несколько локальных зон с различными рабочими температурами и тонкопленочными чувствительными элементами из оксидов железа. При использовании других соединений для чувствительных слоев возможно детектирование угарного газа (СО), озона O_3 и др. Результаты работы могут быть использованы при создании высокочувствительных газовых сенсоров для систем ранней диагностики выделения взрывоопасных и отравляющих газов.

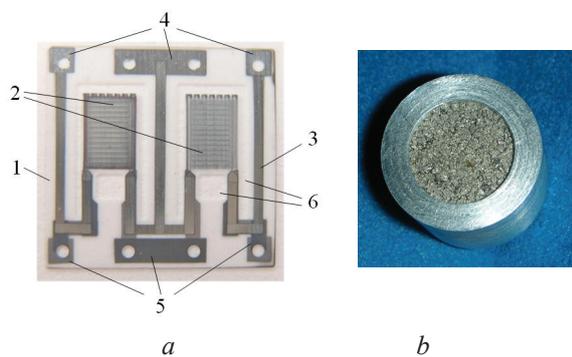


Рисунок 3 – Фотографии образца двухзонного сенсора (а) и корпуса сенсора (b): 1 – диэлектрическая подложка из Al_2O_3 ; 2 – рабочие области сенсора с металлооксидными чувствительными элементами, системами информационных электродов и нагревателями; 3 – тонкопленочные токопроводящие дорожки из сплава нихром; 4 – контактные площадки системы информационных электродов; 5 – контактные площадки нагревателей; 6 – сквозные щели для отделения рабочих областей от массива подложки

Figure 3 – Photos of the sample of the dual-zone sensor (a) and sensor housing (b): 1 – dielectric substrate from Al_2O_3 ; 2 – working area of the sensor with metal oxide-sensitive elements, information electrode systems and heaters; 3 – thin-film conductive paths from nichrome; 4 – contact pads of information electrode systems; 5 – contact pads of heaters; 6 – touch panel mounted on the housing leg

Ряд экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, показал значительные преимущества газовых ПИ по сравнению с ПИ других типов, в первую очередь – раннее время обнаружения возгорания. Даже при отсутствии принудительного воздухообмена газовые ПИ, реагирующие на монооксид углерода СО, будучи установлены не только на потолке, но и на стенах испытательного помещения, срабатывали значительно раньше дымовых ПИ [19]. Чувствительность указанных газовых сенсоров, применяемых в гаражах и на закрытых автомобильных стоянках, может регулироваться в пределах от 0 до 300 $см^3/м^3$ (ppm) с точностью 1 ppm. Высота их установки при размещении на стенах составляет 1 м над уровнем пола, на потолке – 2 м [20]. Полупроводниковые газовые сенсоры имеют ряд преимуществ: длительный период работы без обслуживания; небольшие габаритные размеры; высокое быстродействие; чувствительностью к малым концентрациям измеряемых газов; высокая технологичность изготовления; малые габаритные размеры; невысокая стоимость. Основным недостатком является низкая селективность – избирательность к конкретному газу, которая может быть увеличена путём дифференциации чувствительности с использованием матриц сенсоров, чувствительный слой которых обладает различными параметрами и свойствами.

Заключение

Приведено графическое представление классификации пожарных извещателей в виде обобщённой схемы с использованием всех основных классификационных признаков. Выявлены достоинства и недостатки применяемых в настоящее время пожарных извещателей различных типов, определены оптимальные области их использования в зависимости от пожарной нагрузки. Показана эффективность применения комбинированных пожарных извещателей, оснащённых помимо традиционных дымовых и тепловых датчиков газовыми сенсорами, как комплексного подхода к организации осуществления контроля над охраняемыми объектами.

Приведены результаты разработки высокочувствительного двухзонного сенсора с чувствительными элементами на основе пленок оксида железа для детектирования выделения взрывоопасных и отравляющих газов в начальной стадии тления до образования условий воспламенения.

Сформулированы условия модернизации эксплуатируемых пожарно-охранных систем и повышения их технического уровня. Обоснована необходимость разработки и внедрения современных отечественных газовых сенсоров и их контроллеров для включения в существующие системы пожарной безопасности с целью повышения их функциональной эффективности и надёжности.

Список использованных источников

1. Членов, А.Н. Новые методы и технические средства обнаружения пожара: монография / А.Н. Членов [и др.]. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 175 с.
2. Федоров, А.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара / А.В. Федоров [и др.]. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 158 с.
3. Саутин, И. Концепция построения безопасной противопожарной автоматики / И. Саутин // Алгоритм безопасности. – 2015. – № 4. – С. 68–70.
4. Зайцев, А.В. Сверххранное обнаружение пожара: мифы, с которыми приходится жить / А.В. Зайцев // Алгоритм безопасности. – 2017. – № 1. – С. 54–58.
5. National Fire Alarm Code. Handbook / Fourth edition. Edited by Lee F. Richardson, Wayne D. Moore, P.E., FSFPE. – National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2004. – 680 p.
6. Bukowski, R.W. Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings/R.W. Bukowski [et al.] // NIST Technical Note 1455-1. – 2008. – 265 p.
7. Дробыш, Д.В. Проблемы эффективного применения автономных пожарных извещателей / Д.В. Дробыш, Д.Л. Есипович, А.А. Антошин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2010. – № 2(28). – С. 55–64.
8. Козубовский, В.Р. Сравнительный анализ датчиков газовых извещателей для раннего обнаружения пожара / В.Р. Козубовский, И.З. Мисевич, М.М. Иванчук // Bezpieczenstwo i technika pozarnicza. – 2015. – Т. 40, № 4. – С. 107–122. DOI: 10.12845/bitp.40.4.2015.8
9. Газовые пожарные извещатели: типы, разновидности, плюсы и минусы [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/gazovyye-pozharnyye-izveshateli-tipyi-raznovidnosti-plyusy-i-minusyi>. – Дата доступа: 12.09.2018.
10. Полещук, Р. Комбинированные пожарные извещатели с газовым каналом обнаружения [Электронный ресурс] / Р. Полещук // Режим доступа: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=681&uid2=784&uid3=796>. – Дата доступа: 19.09.2018.

11. Антошин, А.А. Методика исследования пространственного распределения параметров среды и продуктов горения в жилом помещении и смежных с ним пространствах / А.А. Антошин, С.А. Волков // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 347–358.

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

12. Здор, В. Некоторые нюансы применения газовых пожарных извещателей в системах пожарной автоматики. Газовые извещатели в ГОСТ Р 53325-2012 / В. Здор // Алгоритм безопасности. – 2013. – № 3. – С. 24–27.

13. Гаман, В.И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров: монография. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – 112 с.

14. Аверин, И.А. Физические основы полупроводниковых газовых сенсоров: монография / И.А. Аверин // М-во образ. и науки РФ, ФГБОУВПО «Пензенский гос. ун-т» (ПГУ). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. – 188 с.

15. Saniz, R. First-principles study of CO and OH adsorption on In-doped ZnO surfaces / R. Saniz [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2019. – Vol. 132. – P. 172–181. DOI: 10.1016/j.jpss.2019.04.023

16. Буслов, В. Полупроводниковые чувствительные элементы для датчиков газов и систем сигнализации / В. Буслов [и др.] // Современная электроника. – 2008. – № 7. – С. 22–27.

17. Мухуров, Н.И. Адсорбционно-резистивный газовый сенсор / Пат. РБ №10187 // Н.И. Мухуров, С.В. Денисюк, О.Н. Куданович. – Оpubл. АБ № 3. 30.06.2014. – 217 с.

18. Денисюк, С.В. Двухзонные газовые сенсоры на подложках Al₂O₃ с тонкопленочными чувствительными элементами из оксида железа / С.В. Денисюк, Н.И. Мухуров, О.Н. Куданович // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – № 11. – С. 676–688.

19. Неплохов, И.Г. Пожарные извещатели с газовым каналом на российском рынке / И.Г. Неплохов // Системы безопасности. – 2009. – № 5. – С. 102–106.

20. Семенов, В. Интеллектуальный детектор газа / В. Семенов // Современная электроника. – 2007. – № 9. – С. 16–21.

References

1. Chlenov A.N., Fomin V.I., Bucynskaya T.A., Demekhin F.V. *Novye metody i tekhnicheskie sredstva obnaruzheniya pozhara: monografiya* [New methods and technical means of fire detection]. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2007, 175 p.
2. Fedorov A.V., Chlenov A.N., Luk'yanchenko A.A., Bucynskaya T.A., Demyohin F.V. *Sistemy i*

tehnicheskie sredstva rannego obnaruzheniya pozhara: monografiya [Early fire detection systems and hardware]. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2009, 158 p.

3. Sautin I. [The concept of building safe fire automation]. *Algoritm bezopasnosti* [The security algorithm], 2015, no. 4, pp. 68–70 (in Russian).

4. Zaytsev A.V. [Early fire detection: myths to live with]. *Algoritm bezopasnosti* [The security algorithm], 2017, no. 1, pp. 54–58 (in Russian).

5. National Fire Alarm Code. Handbook / Fourth edition. Edited by Lee F. Richardson, Wayne D. Moore, P.E., *FSFPE*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2004, 680 p.

6. Bukowski R.W., Richard D. Peacock, Jason D. Averill, Thomas G. Cleary, Nelson P. Bryner, Paul A. Reneke. Performance of Home Smoke Alarms. Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings. *NIST Technical Note 1455-1*. 2008, 265 p.

7. Drobysh D.V., Yesipovich D.L., Antoshin A.A. [Efficient use of autonomous fire detectors]. *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya* [Emergencies: prevention and response], 2010, no. 2(28), pp. 55–64 (in Russian).

8. Kozubovskiy V.R., Misevich I.Z., Ivanchuk M.M. [Comparative Analysis of Sensors Contained in Gas Detectors Designed For Early Fire Detection]. *Bezpieczenstwo i technika pozarnicza*, 2015, vol. 40, no. 4, pp. 107–122. DOI: 10.12845/bitp.40.4.2015.8

9. [www.fireman.club](https://fireman.club/statyi-polzovateley/gazovyye-pozharnyye-izveshhateli-tipyi-raznovidnosti-plyusy-i-minusy/) [https://fireman.club/statyi-polzovateley/gazovyye-pozharnyye-izveshhateli-tipyi-raznovidnosti-plyusy-i-minusy/]. Accessed: 12.09.2018.

10. [www.tzmagazine.ru](http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=681&uid2=784&uid3=796) [http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=681&uid2=784&uid3=796]. Accessed: 19.09.2018.

11. Antoshyn A.A., Volkov C.A. [Experimental Test Procedure of the Spatial Distribution of Environmental Parameters and Products of Combustion in a Residential Area and Adjacent Spaces]. *Devices and*

Methods of Measurements, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 347–358 (in Russian).

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

12. Zdor V. Particularities of gas fire detectors usage in fire automation systems. Gas detectors in accordance with GOST R 53325-2012. The security algorithm, 2013, no. 3, pp. 24–27 (in Russian).

13. Gaman V.I. *Fizika poluprovodnikovyyh gazovyh sensorov: monografiya* [Semiconductor Gas Sensor Physics]. Tomsk: NTL Publ., 2012, 112 p.

14. Averin I.A. *Fizicheskie osnovy poluprovodnikovyyh gazovyh sensorov: monografiya* [Physical fundamentals of semiconductor gas sensors]. Penza: PGU Publ., 2015, 188 p.

15. Saniz R. Sarmadian N., Partoens B., Batuk M., Hadermann J., Marikutsa A., Rumyantseva M. Lamoen D. First-principles study of CO and OH adsorption on In-doped ZnO surfaces. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2019, vol. 132, pp. 172–181.

DOI: 10.1016/j.jpics.2019.04.023

16. Buslov V., Kozhevnikov V., Kulikov D., Rembesa S., Russkikh D. [Semiconductor sensors for gas sensors and alarm systems]. *Sovremennaya elektronika* [Advanced electronics], 2008, no. 7, pp. 22–27 (in Russian).

17. Muhurov N.I., Denisyyuk S.V., Kudanovich O.N. [Adsorption resistive gas sensor] *Adsorbcionno-rezistivnyj gazovyy sensor* / Pat. RB, no. 10187. AB no. 3. 30.06.2014, 217 p.

18. Denisyyuk S.V., Mukhurov N.I., Kudanovich O.N. [Dual-Zone Gas Sensors on Al₂O₃ Substrates with Thin-Film Sensors from Iron Oxide]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology], 2018, no. 11, pp. 676–678 (in Russian).

19. Neplokhov I.G. [Gas channel fire detectors on Russian market]. *Sistemy bezopasnosti* [Security system], 2009, no. 5, pp. 102–106 (in Russian).

20. Semenov V. [Intelligent Gas Detector] *Sovremennaya elektronika* [Advanced electronics], 2007, no. 9, pp. 16–21 (in Russian).

Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation

M. Gutten¹, M. Šebok¹, D. Korenčiak¹, P. Brnčal¹, M. Kubiš¹, P. Żukowski²,
T.N. Koltunowicz²

¹University of Žilina,
Univerzitná 1, Žilina 010 26, Slovakia,

²Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland

Received 07.10.2019

Accepted for publication 18.11.2019

Abstract

The first part of paper deals with the base information about diagnostics of power transformers. In this part are presented differently insulating methods, for example method of recovery voltage method, method of polarization and depolarization currents and chromatographic analysis.

The second part of paper deals use of method of frequency domain spectroscopy for oil power transformers. This method is used in analysis insulating condition of power transformer with system of oil-paper. It was found, that the results of these tests are highly impacted by the operating temperature during the experimental measurement. Moisture and conductivity between insulating paper and oil in an insulating system are highly dependent from temperature.

In the other part, the paper presents experimental results of the frequency diagnostic measurement for a real single-phase traction transformer 110/27 kV at different operating temperatures and states (with oil and without).

Finally in the last part, the paper presents comparing frequency insulating measurements among several the same single-phase transformers 110/27 kV.

Keywords: transformer, diagnostics, insulation, paper, oil.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

Адрес для переписки:

P. Żukowski
Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland
e-mail: p.zukowski@pollub.pl

Address for correspondence:

P. Żukowski
Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland
e-mail: p.zukowski@pollub.pl

Для цитирования:

M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski,
T.N. Koltunowicz.

Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.

Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 4. – С. 353–359.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

For citation:

M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski,
T.N. Koltunowicz.

Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.

Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 4, pp. 353–359.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

Диагностика частотной области изоляции трансформатора

М. Гуттен¹, М. Шебок¹, Д. Коренчяк¹, П. Брнчал¹, М. Кубиш¹, П. Жуковский²,
Т.Н. Колтунович²

¹Жилинский университет,
ул. Университетская, 1, г. Жилина 010 26, Словакия

²Люблинский технологический университет,
ул. Надбыстрицкая, 38А, Люблин 20-618, Польша

Поступила 07.10.2019

Принята к печати 18.11.2019

В первой части статьи приведены базовые сведения о методах диагностики силовых трансформаторов. В этой части представлены различные методы исследования изоляции, в частности, метод восстановления напряжения, метод токов поляризации и депольаризации и метод хроматографического анализа.

Во второй части статьи рассмотрено использование метода частотной спектроскопии для масляных силовых трансформаторов. Данный метод использован для анализа состояния изоляции силовых трансформаторов с системой масло-бумага. Определено, что на результаты такого анализа значительное влияние оказывает температура окружающей среды при проведении измерений. Влажность и проводимость между бумажной изоляцией и маслом существенно зависят от температуры.

Далее в статье приведены экспериментальные результаты диагностических частотных измерений для однофазного тягового трансформатора 110/27 кВ при различных значениях температуры окружающей среды и в различных состояниях (с маслом и без масла).

В завершающей части статьи выполнено сравнение результатов частотных измерений нескольких однотипных однофазных трансформаторов 110/27 кВ.

Ключевые слова: трансформатор, диагностика, шумоизоляция, бумага, масло.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

Адрес для переписки:

P. Żukowski
Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland
e-mail: p.zukowski@pollub.pl

Address for correspondence:

P. Żukowski
Lublin University of Technology,
Nadbystrzycka str., 38A, Lublin 20-618, Poland
e-mail: p.zukowski@pollub.pl

Для цитирования:

M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski,
T.N. Koltunowicz.

Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.

Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 353–359.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

For citation:

M. Gutten, M. Šebok, D. Korenčiak, P. Brnčal, M. Kubiš, P. Żukowski,
T.N. Koltunowicz.

Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation.

Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 353–359.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-353-359

Introduction

Condition evaluation of insulating the high-voltage oil transformers, particularly of oil conductivity and paper moisture, is becoming more significant for aged power transformers and also for quality control of new equipment in the manufacturing factory. The interest for reliable and easy to use measuring and diagnostic technique drove the development of dielectric time and frequency response methods [1, 2].

It is necessary to know condition of transformer insulation between dielectric elements and insulating properties in operating state.

The first approach, called recovery voltage method (RVM – Figure 1), is nowadays already known. The newer two methods, polarization and depolarization currents (PDC) and frequency domain spectroscopy (FDS), demonstrated their suitability for diagnostics of transformer and are now frequently used [3].

The advantage of these methods is that it is possible to detect moisture in paper insulation and conductivity in oil of power transformers.

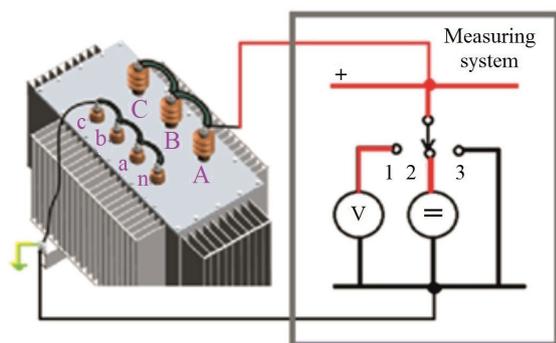


Figure 1 – Principal scheme of recovery voltage method

To prevent failure, it is necessary to analyse the chemical processes in insulating oil and paper, as well as their impact on other components of oil transformers too.

Chromatographic analysis of gases in insulating oil belongs to the physic-chemical methods using of processes that occur due to negative thermal, electrical or combined phenomena in the failure state of the machine insulation systems, which exhibit by production of gases, known as decomposition gases [4, 5].

These types of defects can occur at any time, and because it is an indirect method, allowing detection of gas generated, the challenge is assessed through the composition and quantity of gas, the potential severity of a fault condition of the transformer.

The basic diagnostics of transformers by frequency domain spectroscopy method

Previous research works in condition diagnostics of dielectrical insulation have indicated that the frequency domain spectroscopy can the most effectively estimate deterioration in insulation of oil-paper in power transformer. Since especially the low frequencies (to 0.1 Hz) reflect moisture concentration, their measurement is of outmost importance for reliable data analysis. Beside a frequency sweep, the response of a dielectric to a voltage sweep is experimentally investigated and discussed [9].

Special focus is given on a comparison of the currently available dielectric spectroscopy methods to traditional measurement techniques like dielectric dissipation factor ($\text{tg}\delta$) tests at power frequency and 0.1 Hz, dielectric adsorption ratio and the polarization index. The traditional methods suffer from a limited time or frequency range which impedes the discrimination of specific dielectric properties. If for example increased losses appear, it is impossible to discriminate whether they are caused by the insulating oil or the cellulose paper insulation [6].

Applying a sinus frequency sweep in wide range means to measurement the dielectric responses in depending on quality transformer insulate [7].

Dielectric response of the whole insulation system in transformer depends on different factors i.e. on the properties of impregnated paper and pressboard, on the properties of oil, and on the geometrical arrangement of the system components and a correct evaluation of the measured data. In addition information is required about design of insulation system, i.e. the relative amounts of pressboard barriers and spacers in relation to the amount of oil.

For power transformers insulated oil-paper, the dielectric response consists of three components. They are the response of the cellulose insulation (paper, pressboard), the response of the oil and the interfacial polarization effect. Moisture, temperature, insulation geometry, oil conductivity and conductive aging by-products influence the dielectric response [8].

In Figure 2 is showed the dissipation factor of pressboard having 1 % moisture content and oil together with the interfacial polarization effect (insulation geometry). The frequency range of 1000–10 Hz is dominated by the cellulose insulation, however also the measurement cables and the

connection technique influence this region. Oil conductivity causes the steep slope at 1–0.01 Hz. Dissolved conductive aging by-products, soot and high molecular weight acids increase the oil conductivity and thus influence this area. The interfacial polarization (insulation geometry, ratio of oil to pressboard) determines the local maximum or “hump” at 0.003 Hz [9].

The higher the ratio of oil to pressboard, the more dominating is this effect. Finally, the properties of the cellulose appear again at the frequencies below 0.0005 Hz, here reflecting moisture, the manufacturing process and low molecular weight acids. The frequency limits correspond to Figure 2, but will vary in a wide range with moisture, oil conductivity, insulation geometry, temperature and amount of conductive aging by-products. Moisture particularly increases the losses in the low frequency range of the dielectric response of pressboard. Thus, the point of inflexion on the left hand side of the area dominated by insulation geometry is required for a reliable moisture determination [9, 10].

Method FDS is mainly used for oil-paper insulation; it can also be used for dry transformers or high-voltage equipment with ferrofluid in magnetic field [7].

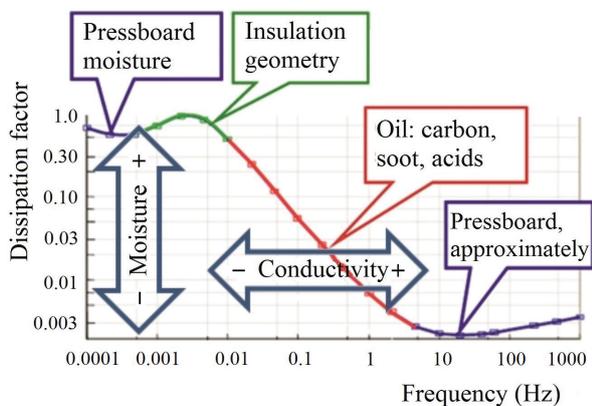


Figure 2 – Analysis of insulating transformer properties by curve of frequency domain spectroscopy method

An experimental measurement was conducted on traction single-phase transformer 110/27 kV, which is installed in high-voltage traction substation, for moisture analysis by dielectric spectroscopy. Measurement was conducted at temperature +15 °C with transformer oil and –5 °C without oil.

For measuring was used apparatus the *MEGGER IDAX-350* was used with the connection according to Figure 3, which works on the principle of dielectric spectroscopy (FDS method) by measuring the

percentage loss factor, capacities and permittivity depending at the frequency of 1 kHz up to 0.0001 Hz in the sinusoidal power supply 140 Vef.

At the first measurement with oil at +15 °C – the total isolation state of the transformer at 20 °C/50 Hz was “good state” according to percentage dissipation factor ($\text{tg}\delta$ (%) = 0.25) and paper moisture was “good state” (1.95 %) by the rating graphs of measuring apparatus *IDAX-350* (Figure 4). At the second measurement without oil at –5 °C in the comparison – the total isolation state of the transformer at 20 °C/50 Hz was better according to $\text{tg}\delta$ (%) = 0.22 and paper moisture was better too (1.50 %). Capacity of insulating system was significantly smaller (Figure 4), because transformer oil is significant part of whole insulating transformer system.

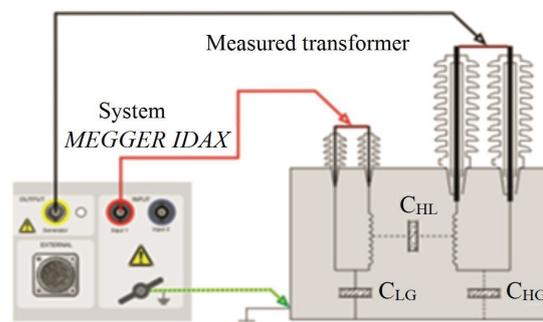


Figure 3 – Connection of the system *MEGGER IDAX-350* to the measured single traction transformer 110/27 kV

According to Figure 4 lower temperature causes shift of curve to lower frequencies (direction to the left). This shift was the proof of the theory graph in Figure 2. Other impact was draining oil before the second measurement, because was reduced conductivity of transformer oil for zero (conductivity direction to left according to Figure 2).

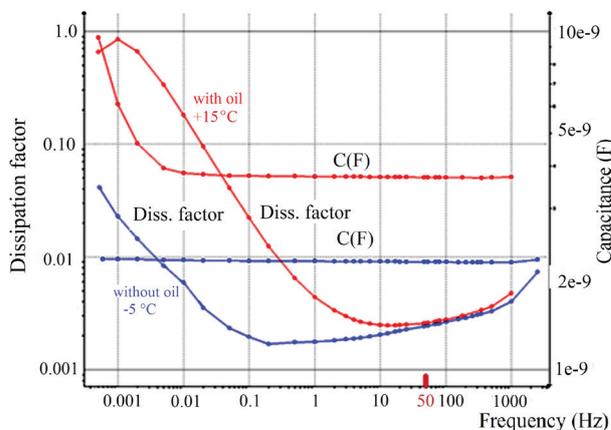


Figure 4 – Measured curves of transformer at different conditions by frequency domain spectroscopy method and apparatus *IDAX-350*

Because measurement is performed at very low currents, it is necessary consistently linking all connections according to Figure 3. Since the device separately distinguishes measurement of individual capacities, it is necessary to thoroughly clean the location for connection of the ground conductor of the device. Poor connection results in errors in current measurements (and then calculated value of percentage loss factor – $\text{tg}\delta$ (%)) at frequencies above 200 Hz (Figure 5).

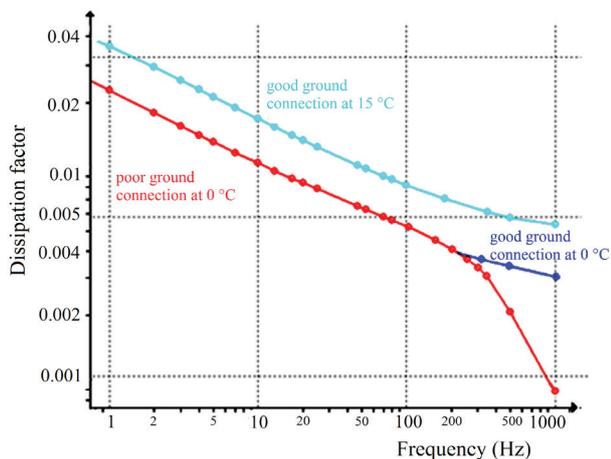


Figure 5 – Measured curves of transformer at different conditions and poor/good ground by frequency domain spectroscopy method and apparatus *IDAX-350*

Comparison of insulating state of the several same transformers

In the part of paper it is described experimental measurement of single-phase oil autotransformers 231/121/10.6 kV, labeled *R, S, T, Q*, which are installed in power substation. It was used frequency method FDS for analysis paper moisture, conductivity in oil and total state of insulating the autotransformers.

Transformers were disconnected from the power source and measured at the ambient temperature of 16 °C. All calculations at 20 °C for the loss factor and 25 °C for the conductivity of the transformer oil were performed by the instrument *MEGGER IDAX-350*.

In this method it was measured parameters – the percentage loss factor, capacities and permittivity depending on the frequency of 10 kHz up to 1 mHz in the sinusoidal power supply 140 Vef.

Measured real capacities and dissipation factor in frequency dependence of measured autotransformer 231/121/10.6 kV, designated *R, S, T, Q* are shown in Figures 6 and 7.

Evaluation and analysis measurement of the individual autotransformers *R, S, T, Q* it was

performed by apparatus *IDAX* according to the rating table (Table 1).

Table 1

Basic analyses by instrument *IDAX-350*

Analysis of transformer status results by <i>IDAX</i>		
$\text{tg}\delta$ (%) at 50 Hz/20 °C	Moisture in paper (%)	Conductivity of the oil at 25 °C (pS/m)
< 0.30 %	< 1.0 %	< 0.37 pS/m
As new	As new	As new
0.30–0.50 %	1.0–2.0 %	< 0.37–3.7 pS/m
Good	Dry	Good
0.50–1.0 %	2.0–3.0 %	3.7–37 pS/m
Deteriorated	Moderately wet	Service aged
> 1.0 %	> 3.0 %	> 37 pS/m
Investigate	Wet	Deteriorated

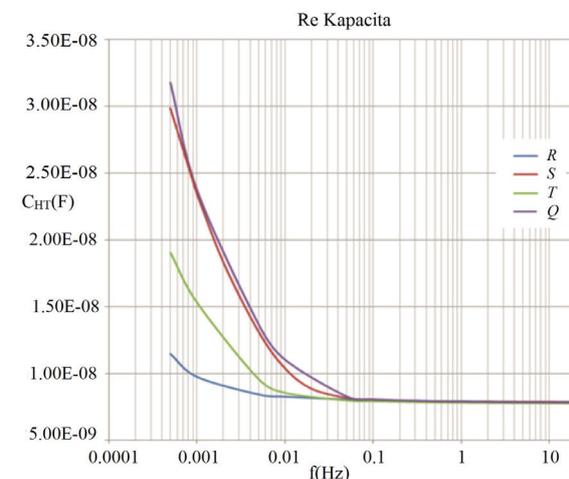


Figure 6 – Comparison of measured autotransformers *R, S, T, Q* according to the real capacities for connection high-voltage winding – tank CHT

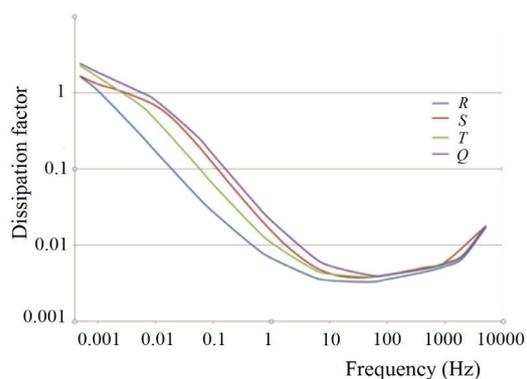


Figure 7 – Comparison of measured autotransformers *R, S, T, Q* according to the percentage dissipation factor ($\text{tg}\delta$ (%)) dependence on frequency

The total isolation state at 20 °C/50 Hz was “good state” according to the rating table of the

percentage dissipation factor ($\text{tg}\delta$ (%)) and analysis of measured curves in Figures 6 and 7.

Discussion on measured data

At comparing these autotransformers according to Table 2, the best (lowest) value of the loss factor $\text{tg}\delta$ (%) state was represented by autotransformer *R* with a value of 0.323 %, transformers *S* and *T* had approximately the same value of range 0.380–0.381 %. Transformer *Q* showed a slightly higher value loss factor $\text{tg}\delta$ (%) = 0.413 %.

Table 2

Comparison of values for autotransformers *R*, *S*, *T*, *Q*

Measured Results of transformers by IDAX			
Trans- formers	$\text{tg}\delta$ (%) at 50 Hz/20 °C	Moisture in paper (%)	Conductivity of the oil at 25 °C (pS/m)
<i>R</i>	0.323	1.9	0.43
<i>S</i>	0.380	2.3	3.44
<i>T</i>	0.381	2.4	1.36
<i>Q</i>	0.413	3	3.28

The insulation state (conductivity) of the oil at 25 °C of the *R*, *S*, *T*, *Q* autotransformers was good according to the oil conductivity table. Temperature at 25 °C is standard for investigation and comparison other transformer oils.

At compared to these transformers, the best (lowest) value of the relative conductivity of the oil was in autotransformer *R* (0.43 pS/m). Transformers *S*, *T* and *Q* had oil values from 1.36 to 3.44 pS/m (Table 2).

The moisture of paper in the individual autotransformers *R*, *S*, *T*, *Q* was different according to the rating table. When comparing all four transformers, the best (lowest) value of the moisture state in the paper showed the transformer *R* (1.9 %), which according to the evaluation table is dry. Autotransformers *S* and *T* had approximately the same humidity value (2.3–2.4 %), which according to the rating table is slightly humid. The last autotransformer *Q* had the highest humidity value (3 %), which, according to the rating table, is the mild to wet boundary between the conditions.

Based on the above-mentioned analysis of the measured values, it is possible to confirm that in the autotransformer *T*, which is currently used as a reserve; most of the moisture is deposited in the paper portion of the insulation. This corresponds to an oil conductivity value of 1.36 pS/m.

From the measured values, it is possible for the autotransformer *T* to estimate that during operation, the conductivity value of the oil would be higher than that of the autotransformers *S* and *Q*, which means that before it is put into full operation, it will be necessary to take action to reduce the moisture state of the autotransformer isolation system *T*.

The analysis further confirms that the oil in the *R* transformer has undergone total regeneration a year before the measurement. The moisture content and oil conductivity values confirm the excellent state for the power class and the size of the autotransformers to be measured.

A slightly higher oil conductivity value in the *S* autotransformer may indicate a higher load than the *Q* transformer. However, the analysis revealed that the moisture content of the *Q* transformer is highest among the other measured units, but this also means a higher susceptibility to the overcurrent failure (Figure 8).

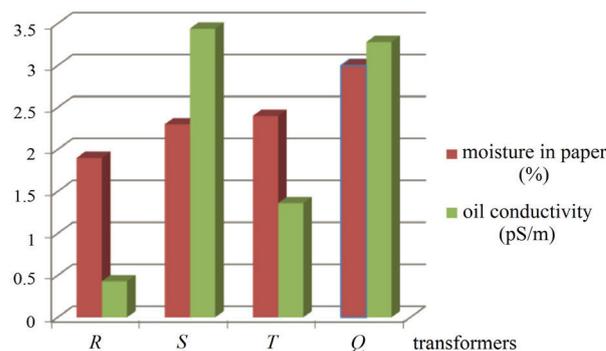


Figure 8 – Table comparison of measured autotransformers *R*, *S*, *T*, *Q* according to the moisture in paper (%) and oil conductivity (pS/m)

Conclusion

Experimental measurements have shown a correlation between the measured values and the operational aspects of the individual transformers. It has been shown that the biggest danger for insulation of oil transformers is their shutdown from operation (the highest moisture of paper in transformer *Q*).

To confirm or disprove the results of spectrum spectroscopy analysis, it would be useful to also analyze the dissolved gas in the oil of the autotransformers measured for the presence of CO_2 and CO gases, the amount of which is mainly influenced by the cellulose quality and possible leakage of the autotransformer vessel. Despite the accuracy of the measuring device, it would be useful to compare the loss factors with the higher measuring instrument.

This experimental analysis is determination of new set of diagnostic measured techniques for the analysis of the state of selected type of oil filled power transformers.

We will also connect physical models describing measurable parameters of partial discharge process with the effect of the degradation of insulation state of oil transformer with the increased originality and the innovation and on that basis will be created new integrated system of diagnostics with the possibility of analysis and classification of possible failures on power transformers.

Acknowledgments

This work was partially supported by the Grant Agency VEGA from the Ministry of Education of Slovak Republic under contract 1/0602/17 and by the Polish Ministry of Science and Higher Education as a science fund of the Lublin University of Technology, at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, FN-28/E/EE/2019 – Researches of electrical, magnetic, thermal and mechanical properties of modern electrotechnical and electronic materials, including nanomaterials and diagnostic of electrical devices and their components.

References

1. Bartłomiejczyk M., Gutten M., Hamacek S. A Combined TOPSIS and FA Based Strategic Analysis of Technical Condition of High Power Transformers. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2013, vol. 11, no. 4, pp. 251–259.
DOI: 10.15598/aeec.v11i4.863

2. Brandt M. Identification failure of 3 MVA furnace transformer. International conference Diagnostic of electrical machines and insulating systems in electrical engineering. *DEMISEE* 2016. Papradno, SR, 2016.

DOI: 10.1109/DEMISEE.2016.7530472

3. Koch M., Krueger M., Puetter M. Advanced Insulation Diagnostic by Dielectric Spectroscopy. *Omicron Electronics Austria*, 2011.

4. Simko M., Chupac M. Non-destructive method of measurement of radio transmitters antenna systems. *Elektronika ir elektrotechnika*, 2011, vol. 107, no. 1, pp. 33–36.

5. Brandt M. Experimental measurement and analysis of frequency responses SFRA for rotating electrical machines. *Elektroenergetika*, 2017, Stará Lesná, SR, pp. 284–288.

6. Koch M., Tenbohlen S., Krüger M., Kraetge A. A Comparative Test and Consequent Improvements on Dielectric Response Methods. Proceedings of the XVth International Symposium on High Voltage Engineering. ISH, Ljubljana, Slovenia, 2007.

7. Koch M. Reliable Moisture Determination in Power Transformers, PhD thesis, Institute of Energy Transmission and High Voltage Engineering. University of Stuttgart, Sierke Verlag Göttingen, 2008.

8. Petras J., Kurimsky J., Balogh J., Cimbala R., Dzmura J., Dolnik B., Kolcunova I. Thermally stimulated acoustic energy shift in transformer oil. *Acta Acustica United with Acustica*, 2016, vol. 102, no. 1, pp. 16–22.

DOI: 10.3813/AAA.918920

9. Koch M., Kruger M. Moisture Determination by Improved On-Site Diagnostics. TechCon Asia Pacific, Sydney, 2008.

10. Neimanis R. On Estimation of Moisture Content in Mass Impregnated Distribution Cables. Stockholm: Royal Institute of Technology Stockholm, 2001, ISSN 1100-1593.

УДК 620.179.16-534.1

Рассеяние упругих волн неоднородной границей при акустическом контроле неразъёмных соединений

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

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

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

Поступила 28.10.2019

Принята к печати 29.11.2019

Повышение надёжности и производительности контроля неразъёмных соединений различных материалов, выполненных сваркой, напылением, склеиванием, пайкой и другими методами, является важной производственной задачей, для решения которой наиболее простым и эффективным является акустический метод. Цель работы заключалась в расширении технических возможностей и повышении чувствительности акустического контроля дефектов сцепления материалов на основе установления закономерностей формирования поля рассеяния упругих волн от неоднородной границы в трёхмерном пространстве и выдаче рекомендаций для разработки методик контроля таких объектов.

Впервые в рамках классических представлений проведён расчёт полей и анализ полей рассеяния падающего акустического луча с круглым поперечным сечением, перемещаемого через границу полубесконечного дефекта. В качестве важного параметра дефекта неразъёмного соединения предлагается использовать фазовый сдвиг между отражёнными от указанных поверхностей волнами, варьируемый в диапазоне $\pi/4$ – π . Он оказывает существенное влияние на диаграмму направленности поля и её угловые экстремумы – минимумы и максимумы разных порядков при перемещении границы дефекта относительно центра пятна акустического луча.

Установлены особенности эволюции структуры поля рассеяния, позволяющие выявить оптимальные условия для обнаружения слабо отражающих звук дефектов. Показана принципиальная возможность оценки площади дефекта (дефектов) по данным изменения амплитуды первичного максимума диаграммы направленности поля рассеяния. Представленные экспериментальные данные находятся в хорошем качественном соответствии с расчётными данными.

На конкретных примерах показана эффективность использования предложенного метода для ряда практических приложений.

Ключевые слова: диаграмма направленности, неразъёмное соединение, рассеяние упругих волн.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

Адрес для переписки:

А.Р. Баев
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.Р. Баев, Н.В. Левкович, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая.
Рассеяние упругих волн неоднородной границей при акустическом
контроле неразъёмных соединений.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 360–372.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

For citation:

A.R. Baev, N.V. Levkovich, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya.
[Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary
in the Acoustic Testing of Permanent Joints].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 360–372 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary in the Acoustic Testing of Permanent Joints

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

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

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

Received 28.10.2019

Accepted for publication 29.11.2019

Abstract

Improving the reliability and testing performance of permanent joints of different materials made by welding, spraying, gluing, soldering and other methods is an important production task, for which the ultrasonic method is the simplest and most effective. The purpose of this work was to expand the technical possibilities and increase the sensitivity of ultrasonic testing of adhesion defects of materials joints based on the establishment of laws governing the formation of a scattering field of elastic waves from an inhomogeneous boundary in three-dimensional space and issuing recommendations for the development of suggested method.

For the first time, in the framework of classical concepts, the scattering fields of elastic waves of an acoustic beam with a circular cross section moving across the boundary of a semi-infinite defect are calculated. It is proposed to use a phase shift between the waves reflected from the indicated surfaces, which varies in the range of $\pi/4$ – π , as an important parameter of the material joint's defect. It has a significant effect on the field pattern and its angular amplitude extrema — minima and maxima of different orders when the defect boundary is moved relative to the center of the acoustic beam spot.

The features of the evolution of the structure of the scattering field are established, which make it possible to identify optimal conditions for the detection of weakly reflective defects in sound. It is shown that it is possible in principle to estimate the defect's area by measuring a change in the amplitude of the primary maximum of the radiation pattern of the scattered waves.

Specific examples show the effectiveness of using the proposed method for a number of practical applications.

Keywords: radiation pattern, one-piece connection, scattering of elastic waves.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

Адрес для переписки:

А.Р. Баев
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

A.V. Danilenko
Institute of the Housing and Communal Services National
Academy of Sciences of Belarus, Akademika Kuprevicha str., 68,
Minsk 220141, Belarus
e-mail: zl@tut.by

Для цитирования:

А.Р. Баев, Н.В. Левкович, А.Л. Майоров, М.В. Асадчая.
Рассеяние упругих волн неоднородной границей при акустическом
контроле неразъёмных соединений.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 360–372.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

For citation:

A.R. Baev, N.V. Levkovich, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya.
[Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary
in the Acoustic Testing of Permanent Joints].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 360–372 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

Введение

Создание неразъёмных соединений различных объектов сваркой, напылением, склейкой, пайкой и другими методами широко используется в современном производстве. Повышение износостойкости, долговечности функционирования таких объектов требует высокочувствительного и надёжного контроля качества сцепления материалов – металл-металл, металл-неметалл, неметалл-неметалл как непосредственно на стадии производства, так и в процессе их эксплуатации. При этом наиболее простым и эффективным является акустический метод, заключающийся в зондировании объекта упругими волнами, параметры которых при рассеянии претерпевают изменения, включая амплитуду A , временную и фазовую задержки, а также направленность поля рассеяния [1]. В то же время значительные проблемы возникают при контроле неразъёмных соединений материалов, в которых: а) физико-химические процессы, обуславливающие межмолекулярное взаимодействие, диффузию и др., произошли недостаточно полно; б) характерные размеры дефектов сцепления материалов сравнимы или меньше длины зондирующей волны λ . Для случая (а) характерны дефекты сцепления типа *kiss-bond*, которые достаточно часто встречаются при сварке полимеров, металлических соединений, при приклейке резин и полимерных материалов к металлам. Возникают также проблемы оценки эффективной площади дефектов сцепления материалов.

В первом случае для этих целей делаются попытки применения импульсно-лазерного воздействия, зондирующего исследуемую зону объекта широким спектром коротких акустических импульсов, что вследствие эффекта «селективности» приводит к изменению амплитуды и формы отклика при наличии дефектности сцепления материалов [2]. По сути дела и в другом методе [3] используется подобный принцип, однако при этом возбуждение упругих волн (УВ) осуществляется путём изменения частоты зондирующей волны.

В работе [4] рассмотрена возможность использования эффекта интерференции высокочастотного сигнала при контроле адгезии и толщины тонких защитных слоёв. Именно в результате изменения эффективного импеданса контактирующих материалов вследствие ослабления адгезии материалов или изменения толщины слоя

при многократном отражении коротких импульсов будут наблюдаться амплитудные (и фазовые) изменения сигнала–отклика.

Достаточную эффективность при контроле слоистых материалов показали методы, основанные на использовании волн Рэлея и Стоунли, распространение которых по границе с нарушенной адгезионной связью приводит как к амплитудным, так и фазовым изменениям зондирующей волны, что, естественно, может быть использовано для контроля ограниченного круга объектов [5, 6].

В работе [7] рассмотрены вопросы выявления расслоений в деталях с высоким коэффициентом затухания полимерных композиционных материалов в многослойных клееных конструкциях низкочастотным акустическим методом. При этом предлагается зондирование объектов производить путём воздействия низкочастотных колебаний, время прохождения которых в результате эффектов дифракции на рассеяния, изменяются в зависимости от «повреждённости» объекта. Интересен подход, предложенный в работе [8], где на основе приближений Кирхгофа аналитически определено поле, сформированное отражением волны от границы раздела сред с резким градиентом. А также приведён алгоритм повышения точности локализации границы разрыва, основанный на выявлении корреляционных связей параметров волн в разных точках. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных показало их качественное соответствие.

Что касается другого случая, то традиционные подходы, основанные на прямом измерении изменения амплитуды и используемые, как правило, для обнаружения дефектов в объёме материала без учёта особенностей формирования поля рассеяния ультразвуковых колебаний (УЗК) $A(\varphi, \psi)$ на двумерных дефектах неразъёмных соединений, не обладают высокой чувствительностью.

Как показывает подробный анализ механизма взаимодействия УВ на границе раздела сред, при их прохождении или отражении в той или иной мере изменяются амплитудные (A_N , A_D) и фазовые (ϕ_D , ϕ_N) характеристики, где индексы D и N относятся к отражению (прохождению) УВ от дефектной поверхности площадью S_D и (или) бездефектной поверхности площадью $S_N = S_0 - S_D$, где S_0 – площадь пятна (поперечного сечения) акустического луча (АЛ) на поверхности объекта. Причем для условий, при которых

различие в отражательной способности УВ (и по фазе, и по амплитуде) от поверхностей S_N и S_D небольшое, наиболее значимым параметром, влияющим на структуру поля рассеяния, является именно фазовый сдвиг $\phi = \phi_N - \phi_D$, приобретённый при отражении или прохождении волн через контролируемую зону. Как правило, выявление дефектной поверхности непосредственно по данным измерения ϕ может быть реализовано при $S_D > S_0$ и наличии в приборе измерительного фазо- или частотно-фазового блока. При этом эффективность измерений будет достигнута лишь в условиях, близких к идеальным, включая неизменность геометрии поверхности, высокую стабильность акустического контакта, однородность структуры материалов и шероховатость поверхности ($R_z \ll \lambda$), длительность импульса. Имеются также и другие методы оценки дефектности путём использования теневого, эхо-сквозного режимов прозвучивания объектов как объёмными, так и поверхностными волнами, что трудно реализуемо в условиях современной технологии акустического контроля и измерений.

Как нами было показано ранее [9], для выявления слабо отражающих УВ дефектов сцепления материалов может быть использован предложенный нами метод, заключающийся в оптимизации апертур и фаз мнимых источников УВ, рассеянных неоднородной границей. Для удобства основное рассмотрение и решение поставленной задачи проводим, заменив реальные источники УВ мнимыми, сила излучения которых $F_N = A_0 K_N S_N$ и $F_D = A_0 K_D S_D$ соответственно.

При этом используется детерминированный подход, включающий, прежде всего, выбор такого пространственного положения источника УВ, при котором разность фаз ϕ между УВ, отражёнными от бездефектной и дефектной поверхностей, которым соответствуют коэффициенты отражения волн K_N и K_D , максимальная. На основании этих данных аналитически или опытным путём подбирается такой экваториальный (ψ^*) и меридианальный (ϕ^*) углы поля-приёма рассеянного сигнала, при которых изменение амплитуды опорного сигнала при сканировании объекта максимальное, т. е.

$$A^*(\psi, \phi) = \text{Max}|(A_0/A)|, \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда опорного сигнала, т. е. отражённого от бездефектной поверхности.

Учитывая особенности измерений сигналов при ультразвуковом контроле, следует заметить, что именно отношение указанных амплитуд является наиболее чувствительным параметром при выявлении дефектов, а не их разница.

Что касается выполненных ранее исследований [10], то на том этапе они были преимущественно посвящены решению рассматриваемой проблемы в двумерной постановке и, преимущественно, в предположении, что $\phi = \rightarrow|\pi|$. Именно в этом случае на оси диаграммы направленности поля рассеяния (или поля мнимых источников) наблюдаются существенные изменения акустического сигнала при пересечении сканирующим акустическим пучком границы дефектной и бездефектной зоны сцепления материалов. Однако, в случае, когда различие между величинами, характеризующими (с точки зрения акустики) степень сцепления материалов, включая коэффициенты отражения (K_D , K_N) и фазы (ϕ), небольшое, а площадь дефекта $S_D \ll S_N$, то требуется проведение дальнейших исследований с целью оптимизации акустического измерительного тракта для повышения надёжности и чувствительности акустического контроля неразъёмных соединений.

Цель настоящей работы заключалась в расширении технических возможностей и повышении чувствительности акустического контроля дефектов сцепления материалов на основе преимущественного изучения закономерностей формирования поля рассеяния УВ от неоднородной границы в трёхмерном пространстве и выдаче рекомендаций для разработки соответствующих методик применительно к контролю неразъёмных соединений со слабо отражающими УВ (или выявляемыми) дефектами.

Анализ полей рассеяния при пересечении границы полубесконечного дефекта пятном акустического пучка (рисунок 1)

Как упомянуто выше, в общем случае задача об определении оптимальных условий для выявления дефектов сцепления материалов разделяется на несколько этапов. На первом этапе проводится численный расчёт и (или) экспериментальные исследования, при которых определяются допустимые условия, обеспечивающие максимально возможный фазовый сдвиг между опорной волной, соответствующей отражению УВ

от бездефектной поверхности, и волной, отражённой от дефектной поверхности. Как показывают наши численные расчёты, а также данные, приведённые в работе [1], изменение угла β падения УВ на однородную границу сред, а также варьирование граничных условий в области контакта материалов, их удельных акустических сопротивлений может приводить к существенному изменению коэффициента отражения K и фазового сдвига отражённых волн $\phi = \phi(\beta)$. На втором же этапе определяются угловые параметры приёма УВ, обеспечивающие максимальное изменение амплитуды опорного сигнала при наличии дефекта сцепления материалов.

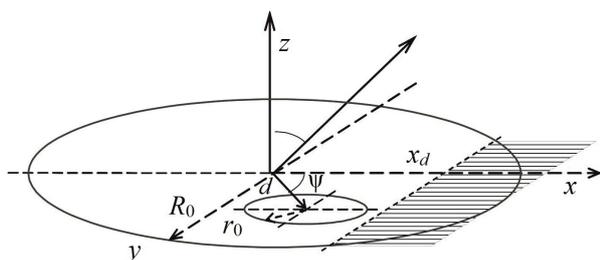


Рисунок 1 – К расчёту поля рассеяния упругих волн от граничной поверхности сцепления материалов с дефектом в виде круглого пятна и бесконечной полуплоскости

Figure 1 – To the calculation of the scattering field of elastic waves from the boundary surface of adhesion of materials with a defect in the form of a round spot and an infinite half-plane

$$A = A_0 + A_{D1} + A_{D2} = A_{00} [S_0 K_{R0} F_0(\psi, \phi, \dots) + A_{00} S_{D1} K_D F_D(\psi, \phi, \phi, \dots) - A_{00} S_D K_{D2} F_{01}(\psi, \phi, \dots)], \quad (2)$$

где A_{00} – амплитуда падающего на границу сред акустического луча (АЛ); A_0 – поле рассеяния в дальней зоне при падении луча УЗК на поверхность $S \subset S_0$, а A_{D1} и A_{D2} – поля рассеяния УЗК от дефектной поверхности S_D , где

$$A_0(\phi, R, r, d, \psi) / A_{00} = K_N \int_{-R}^R 2\sqrt{R^2 - x^2} e^{ikx \sin \phi} dx; \quad (3)$$

$$A_{D1}(\phi, R, r, d, \psi) / A_{00} = -K_N \int_{d \sin \psi - r}^{d \sin \psi + r} 2\sqrt{r^2 - (x - d \sin \psi)^2} e^{ikx \sin \phi} dx;$$

$$A_{D2}(\phi, R, r, d, \psi) / A_{00} = K_D e^{i\theta} \int_{d \sin \psi - r}^{d \sin \psi + r} 2\sqrt{r^2 - (x - d \sin \psi)^2} e^{ikx \sin \phi} dx,$$

F_0, F_{01}, F_D – соответствующие нормализованные интегральные функции, причём $F_{01} \equiv F_0$ для области интегрирования $S \subset S_D$.

Отметим, что в общем случае, когда оптимальный угол падающего на границу материалов зондирующего пучка β установлен, а величина

В реальной ситуации в большинстве случаев могут существовать граничные условия, описывающие взаимодействие соединяемых поверхностей, при которых амплитудные и фазовые характеристики рассеянных УВ сложным образом зависят от параметров зондирующего сигнала и условий его приёма. Учитывая тот факт, что для значительного числа объектов контроля, имеющих дефектные области сцепления материалов, выполняются условия для амплитуды отражённых УВ $A_D \approx A_N$ и фазы $\pi \gg \phi$, были проведены расчёты поля рассеяния УВ в трёхмерном пространстве.

Ниже рассмотрена ситуация и представлены результаты исследования, касающиеся рассеяния акустического луча, имеющего поперечное сечение в виде круглого пятна радиусом R с центром в координате $x = y = z = 0$, от поверхности сцепления материалов, на которой имеется полубесконечный дефект. Граница последнего представляет собой прямую, перпендикулярную оси x и расположенную от центра пятна акустического луча на расстоянии $x = d$, которое варьируется в диапазоне $x_d = x/d = 1-0$.

Согласно данной постановке задачи, результирующее поле рассеяния УВ представлено в виде суперпозиции полей трёх мнимых источников, каждое из которых описывается интегральным выражением:

фазового сдвига ϕ известна, то математически задача сводится к определению максимума функции $A^*(\psi, \phi)$ (2), что позволяет на первом этапе оценить максимальную чувствительность метода, определив ψ^* и ϕ^* из соответствующих уравнений и неравенств $\frac{\partial \Delta A^*}{\partial \psi} = \frac{\partial \Delta A^*}{\partial \phi} = 0, \frac{\partial^2 \Delta A^*}{\partial^2 \psi} < 0, \frac{\partial^2 \Delta A^*}{\partial^2 \phi} < 0$.

На рисунках 2–5 представлены результаты теоретического и экспериментального исследования полей рассеяния в трёхмерном пространстве с целью выявления оптимальных условий для обнаружения дефектов сцепления, обладающих слабой отражающей способностью. Приведены амплитудно-угловые зависимости полей рассеяния УВ в характерных сечениях, свидетельствующие о возможности существенного повышения чувствительности, эффективности контроля неразъёмных соединений путем приёма волн под оптимальным экваториальным и

меридианным углами. Опытные данные, моделирующие рассеяние поверхностных УВ при различных условиях сцепления материалов, иллюстрируются на рисунках 3 и 5.

О выявлении дефектов при приёме упругих волн под углом $\varphi = 0$

На рисунке 2 приведены расчётные характеристики поля рассеяния для одного из характерных случаев перемещения пятна АЛ через границу полубесконечного дефекта сцепления материалов, характеризуемого фазовым сдвигом $\phi \rightarrow -\pi$. Подобная ситуация имеет место, например, при контроле отслоения резины или полимерного материала от стальной подложки, оловянно-свинцового покрытия от чугунной, латунной подложки подшипников скольжения и др. Причём поверхность последней по отношению к падающему на неё акустическому лучу представляет собой свободную границу, напряжения $\sigma_{ik} = 0$. И в этом случае:

$$\Delta K_{DH} / (K_H + K_D) \leq 0,2, \text{ где } \Delta K_{DH} = K_H - K_D.$$

Как непосредственно следует из (3) и представлено на рисунке 2, по мере смещения границы дефекта к центру пятна АЛ эволюция структуры поля рассеяния или диаграммы направленности (ДН) изменяется сложным образом в разных плоскостях сечения, характеризуемых экваториальным углом ψ .

Как видно, по мере приближения границы дефекта к центру пятна АЛ наблюдается уменьшение амплитуды поля рассеяния на первоначальной оси z вплоть до нуля при характерном значении x_d , соответствующем площади дефекта S_D . Причём связь между относительной величиной изменения амплитуды на оси ДН $\Delta A^* = (A_0 - A)/A_0$, площадью дефекта и коэффициентами отражения имеет вид:

$$\Delta A^* = S_D / S_0 (1 + K_D / K_H), \quad (4)$$

что принципиально позволяет оценить площадь захвата акустическим лучом дефектной поверхности по данным изменения амплитуды УВ на оси диаграммы направленности поля рассеяния:

$$S_D = \Delta A^* (1 + K_D / K_H)^{-1} S_0.$$

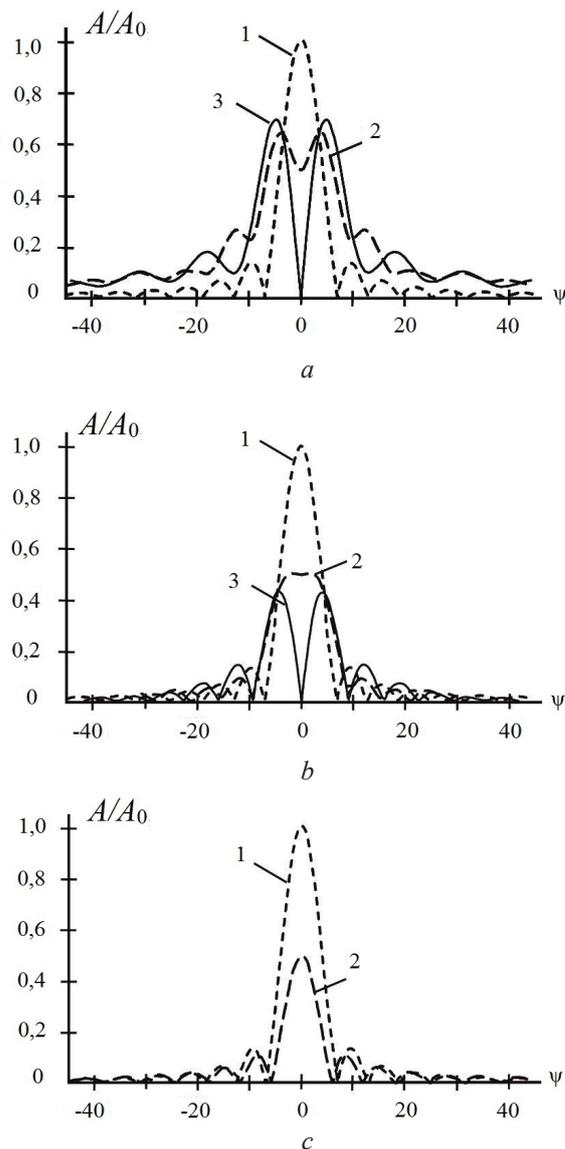


Рисунок 2 – Поля рассеяния упругих волн в плоскости сечения диаграммы направленности, характеризующей экваториальным углом ψ , от положения границы полубесконечного дефекта $x_0 = d$, когда $\phi = \pi$: ψ , град. = 0 (а), 45 (б), 90 (с); $x_d = x_0/d = 1$ (1), 0,4 (2), 0 (3)

Figure 2 – Scattering fields of elastic waves in the sectional plane of the ultrasound radiation pattern, characterized by the equatorial angle ψ , vs. the position of the boundary of the semi-infinite defect $x_0 = d$, when the phase shift between reflected waves is $\phi = \pi$: ψ , deg = 0 (a), 45 (b), 90 (c); $x_d = x_0/d = 1$ (1), 0,4 (2), 0 (3)

При достижении нулевого значения амплитуды сигнала в окрестности угла приёма $\varphi = 0$ и любом ψ :

$$S_D = (1 + K_D / K_H)^{-1} S_0.$$

Приведённые выше оценочные формулы корректны и для случая, когда дефект имеет произвольную форму, но при фазовом сдвиге $\phi = \pm\pi$. В случае, когда дефектов несколько (n_0), выражение (4) примет вид: $\Delta A^* = \sum_{n=1}^{n_0} (1 + K_{Dn} / K_H) S_{Dn} / S_0$, а суммарную площадь представляется возможным оценить только при $K_D/K_H = 1$.

Необходимо отметить, что при реализации указанных измерений потребуется использование зеркально-теневого метода и, при необходимости, введение некоторых поправочных коэффициентов, учитывающих особенности акустического тракта, используемых пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) и их рабочих характеристик. В частности это касается количества осцилляций в импульсном сигнале, угла ввода УВ в объект, а также угла приёма ПЭП с заданными характеристиками.

Проведённые расчёты показывают, что независимо от величины фазового сдвига ϕ и отражательной способности областей рассеяния волн (K_D, K_N), поля рассеяния $A(\phi)$, измеренные в плоскостях сечения, характерных для экваториального угла $\pm\psi_i$, одинаковы, но имеют разную структуру, изменяющуюся при движении дефектной области к центру пятна акустического луча. Как легко показать, если контур дефекта представляет симметричную фигуру относительно плоскости $y = 0$ и находится внутри пятна АЛ, то при смещении к его центру вдоль оси x функция $A(\phi)$ не только сохраняет симметрию в этой плоскости, но и неизменна по величине. Если же $\phi < |\pi|$, а также отсутствует соосность дефекта (с радиальной симметрией) и пятна АЛ, то симметрия функции $A(\phi)$ относительно оси z нарушается.

Как видно из рисунка 2, по мере поворота плоскости приёма УВ в диапазоне углов $\psi = 0 - (\pm\pi/2)$, структура поля рассеяния $A(\phi)$ хотя и существенно изменяется, однако амплитуда сигнала на оси z (или $\phi = 0$) остаётся постоянной, что следует из (2) и справедливо для случая расположения любого количества дефектов с фазовым сдвигом $\phi = \pm\pi$ в пятне АЛ. При этом приём рассеянного сигнала с целью получения надёжного результата может производиться различными способами, реализация которых требует знания эволюции пространственной структуры поля при перемещении пятна АЛ относительно дефектов.

Исходя из особенностей изменения структуры поля в окрестности основного лепестка рас-

крытия при варьировании экваториального угла в диапазоне $\psi = 0 - (\pm\psi^*)$, необходимо учесть возможное влияние на измерительный процесс боковых лепестков поля, амплитуда которых $A_B(\pm\phi_B)$ достигает максимума при $\psi = 0$ и минимума при $\psi = \pm\pi/2$. При этом, функция $A(\phi, \psi)$ в окрестности $\phi \rightarrow 0$ описывает поверхность, подобную седловой поверхности, где $\partial A / \partial r = 0$ при $\phi = 0$, а знак $\partial^2 A / \partial r^2$ определяется экваториальным углом ψ . Величина же последнего зависит от чувствительности приёмного ПЭП, его геометрии и частоты волны. Отметим, что для повышения надёжности обнаружения потенциально опасных слабо выявляемых дефектов приём УВ может производиться одновременно несколькими ПЭП, углы которых ϕ и ψ могут существенно различаться.

На рисунке 3 представлены некоторые данные по моделированию процесса отражения продольных УВ от полубесконечной границы, которая создаётся с помощью контакта стального параллелепипеда через тонкую жидкую прослойку с плексигласовым образцом, по внешней поверхности которого перемещается раздельно-совмещённый ПЭП, излучающий и принимающий продольные волны с рабочей частотой 2,5 МГц.

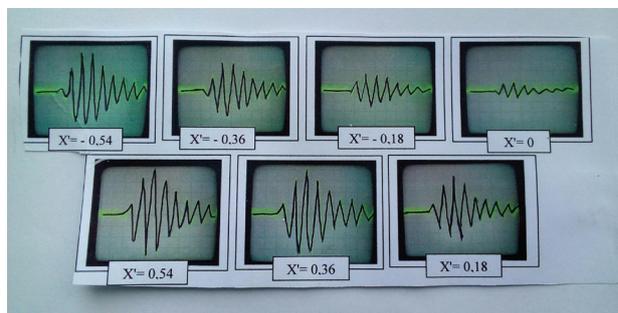


Рисунок 3 – Осциллограммы акустического сигнала, отражённого от неоднородной границы, в зависимости от положения пятна акустического луча относительно модельного дефекта

Figure 3 – Oscillograms of the acoustic signal reflected from the inhomogeneous boundary, depending on the position of the spot of the acoustic beam relative to the model defect

На рисунке 3 приведены осциллограммы акустического сигнала, отражённого от неоднородной границы. Как видно, при скольжении пятна АЛ в области границы контакта стального образца (акустической нагрузки) с плексигласом в окрестности координаты $x = 0$ наблюдается падение амплитуды рассеянного сигнала на 14–16 дБ по отношению к опорному сигналу,

что, как указывалось выше, обусловлено интерференцией УВ, отражённых от свободной поверхности плексигласа (моделирующей дефект) и границы контакта стального образца с плексигласом. В данном случае моделирования различие коэффициентов отражения K_D и K_H составляет $\approx 12\text{--}14\%$, что вызывает некоторую асимметрию зависимости $A(x)$.

Необходимо отметить, что эффективность методики контроля неразъёмных соединений, в которой принимается во внимание только отражательная способность дефектной и бездефектной поверхности (но не фазовые характеристики отражённых волн), будет низкой. При этом также возникнут проблемы отбраковки, связанные с выявлением дефектов сцепления в области пятна АЛ и оценки их размеров.

О выявлении дефектов при «незеркальном» приёме рассеянного сигнала упругой волны

Если дефект достаточно мал ($S_D/S_N \ll 0,1\text{--}0,2$), или фазовый сдвиг между рассеянными модами от дефектной и бездефектной поверхности небольшой, то указанная выше схема выявления дефектов (см. выше «О выявлении дефектов при приёме упругих волн под углом $\varphi = 0$ ») путём их приёма под углом $\varphi \rightarrow 0$ будет недостаточно эффективной из-за ряда особенностей контроля, включая нестабильность акустического контакта, обусловленную геометрией изделия и шероховатостью поверхности. В то же время амплитуда поля A_D рассеяния УВ от таких дефектов при некоторых углах $\varphi \neq \varphi^*$ может быть не только близка к амплитуде поля рассеяния A_N , но и значительно превосходить её по величине в окрестности минимума поля 1-го и других порядков. Причём возможен ряд вариантов измерений, при которых будет наблюдаться максимальная чувствительность контроля применительно к трудно выявляемым дефектам. Суть одного из них поясняется на рисунке 4 расчётными данными. Она состоит в том, что для углов приёма, совпадающих с углами минимумов первого и более высоких порядков ($\varphi \rightarrow \varphi_{mi,j}$) отсутствует интерференция первичного источника поля с полем рассеянных дефектом волн. Так что результирующая амплитуда сигнала УВ $A \rightarrow A_D$ – независимо от фазы волны, рассеянной от дефекта. И, как следует из формулы (1), в окрестности указанного угла $\Delta A^* \rightarrow \infty$. Однако на практике это не выполняется строго, так как необходимо учесть

особенности излучения и приёма УВ, включая конечные размеры приёмного ПЭП, имеющийся шумовой фон в акустическом тракте и др.

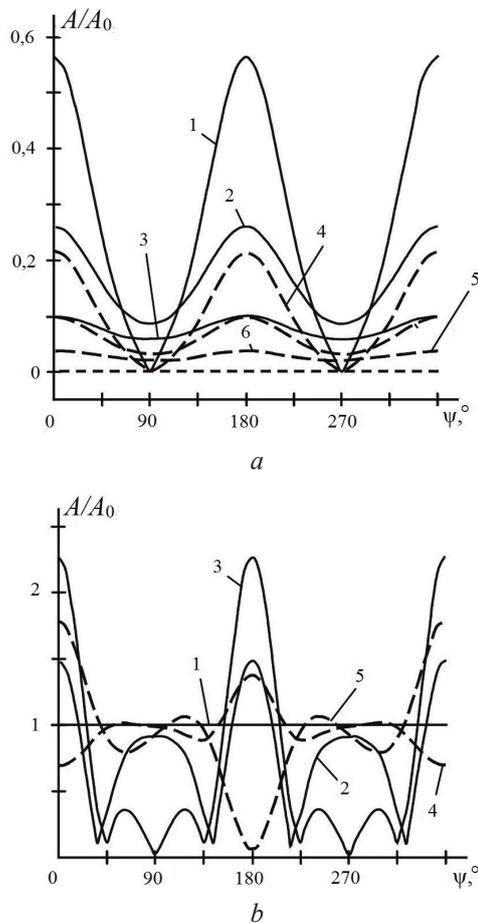


Рисунок 4 – Амплитуда минимума (а) и максимума (б) первого порядка поля рассеяния упругой волны от положения границы полубесконечного дефекта относительно центра пятна акустического луча. а: фазовый сдвиг ϕ , рад = π (1–3); $\theta = \pi/4$ (4–6); $x_a = x/a = 0$ (1, 3); 0,6 (2, 4); 0,8 (3, 6); б: ϕ , рад = π (1–3); $\theta = \pi/4$ (1, 4, 5); $x_a = x/a = 1$ (1); 0,5 (2,4); 0 (3,5)

Figure 4 – The amplitude of the minimum (а) and maximum (б) of the first order of the scattering field of the elastic wave from the position of the boundary of the semi-infinite defect relative to the center of the spot of the acoustic beam а: phase shift ϕ , rad = π (1–3); $\theta = \pi/4$ (4–6); $x_a = x/a = 0$ (1, 3); 0,6 (2, 4); 0,8 (3, 6); б: ϕ , rad = π (1–3); $\theta = \pi/4$ (1, 4, 5); $x_a = x/a = 1$ (1); 0,5 (2,4); 0 (3,5)

Очевидно, что при реализации приёма волн в окрестности этих углов будет наблюдаться рост акустического сигнала независимо от величины фазового сдвига ϕ между рассеянными волнами. Необходимо отметить, что при настройке измерительной схемы для контроля рекомендуется использовать в качестве опорного сигнала

ближайший максимум ненулевого порядка либо шумовой фон.

С другой стороны, при выборе угла приёма φ , в окрестности которого амплитуда рассеянных УВ по величине сопоставима с подобной амплитудой опорного сигнала, а результирующий фазовый сдвиг $\phi^* = \phi + x \sin \varphi \rightarrow \pm \pi$, следует ожидать существенного уменьшения сигнала при появлении дефекта. Это поясняется на рисунке 4b, где приведена расчётная зависимость амплитуды максимума 1-го порядка от экваториального угла ψ при прохождении пятном УВ границы полубесконечного дефекта.

В ряде случаев, когда величина фазового сдвига небольшая ($\approx 0,25\pi - 0,5\pi$ и меньше), что соответствует недостаточно прочной связи между контактирующими материалами, рекомендуется в качестве опорного сигнала при его приёме выбирать углы УВ, лежащие в окрестности максимумов 1-го и 2-го порядка. Это неплохо подтверждается экспериментальными данными, приведёнными на рисунке 5, где изменение амплитуды рассеянного сигнала в окрестности границы моделируемого полубесконечного дефекта (зависимость 3) уменьшается на ≈ 40 дБ (≈ 100 раз).

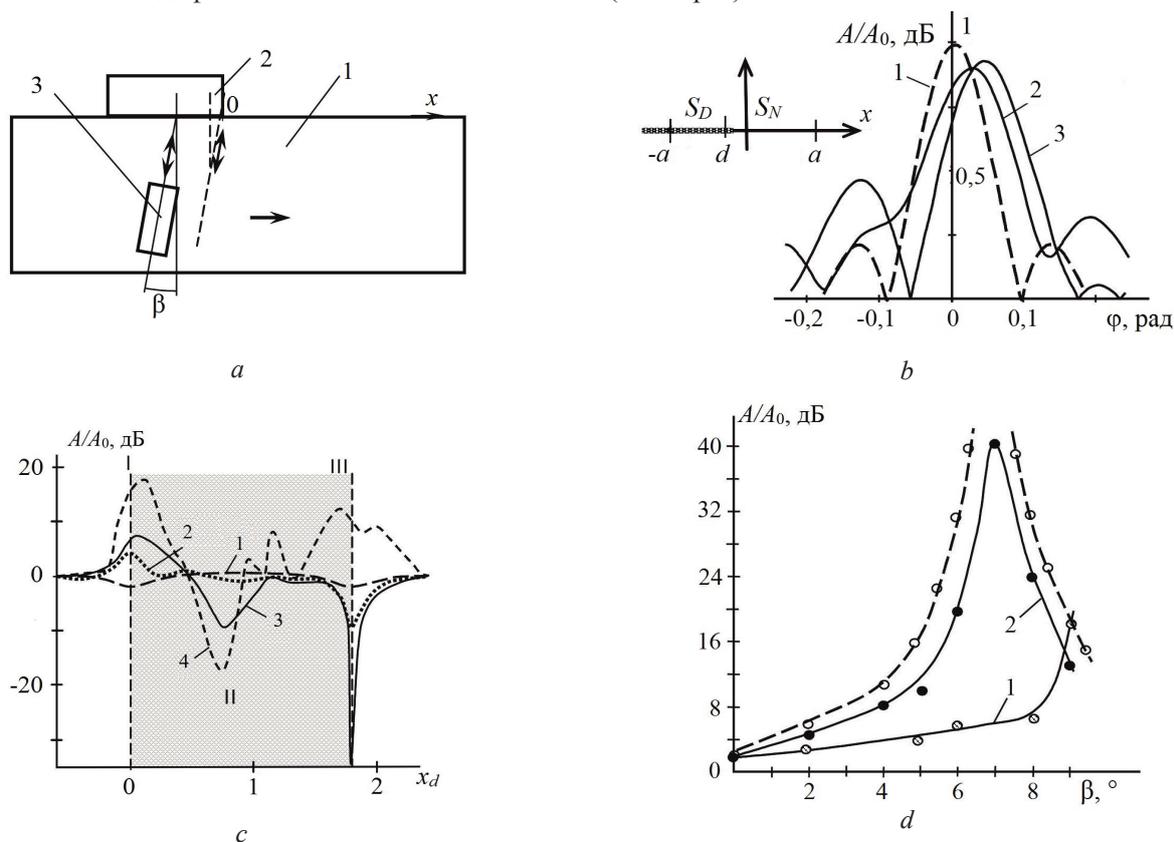


Рисунок 5 – Схема эксперимента (a) и данные исследования (b–d) влияния угла излучения–приёма упругой волны на амплитуду рассеянной волны при различном положении АЛ относительно границ сцепления алюминия со стальным образцом. a: 1 – алюминий, 2 – сталь, 3 – ПЭП поверхностных волн, $\phi \approx 0,45$, $f = 1,8$ МГц; b: расчётное поле рассеяния упругой волны при разном положении пятна упругой волны относительно границы моделируемого дефекта $x_d = d/a = -1$ (1), $-0,8$ (2), $0,7$ (3), $\phi_D = \pi/2$; c: амплитуда поля рассеяния ПАВ при изменении положения центра пятна упругой волны при разных углах наклона ПЭП $\beta = 0^\circ$ (1); 5° (2); 7° (3), 11° (4), $2a/\lambda = 9,3$; d: изменение амплитуды ПАВ в окрестности границ I (1) и II (2, 3) модельного дефекта: 1, 2 – эксперимент, 3 – теория

Figure 5 – Scheme of the experiment (a) and research data (b–d) of the effect of the angle of emission–reception of an elastic wave on the amplitude of a scattered wave at different positions of the AP relative to the boundaries of adhesion of aluminum to a steel sample. a: 1 – aluminum, 2 – steel, 3 – surface wave transducer, $\phi \approx 0,45$, $f = 1,8$ MHz; b: the calculated scattering field of the elastic wave at different positions of the elastic wave spot relative to the boundary of the simulated defect $x_d = d/a = -1$ (1), $-0,8$ (2), $0,7$ (3), $\phi_D = \pi/2$; c: the amplitude of the scattering field of surface waves with a change in the position of the center of the spot of the elastic wave at different angles of inclination of the transducer $\beta = 0^\circ$ (1); 5° (2); 7° (3), 11° (4), $2a/\lambda = 9,3$; d: change in the amplitude of surface waves in the vicinity of the boundaries of the I (1) and II (2, 3) model defect: 1, 2 – experiment, 3 – theory

Прикладные аспекты

Одно из перспективных направлений применения результатов настоящей работы связано с решением задачи контроля объектов, включая объекты повышенной опасности для человека и окружающей среды. Результаты исследований были применены на практике для контроля неразъёмных соединений ряда изделий и внедрены на ряде предприятий Республики Беларусь. Необходимо отметить эффективность применения результатов работы в следующих направлениях.

Контроль качества сцепления полимерных покрытий металлических объектов

Как упоминалось ранее, выявление нарушения сплошности соединения основания с защитным полимерным слоем представляет трудности по следующим причинам, включая: а) близость коэффициентов отражения УВ от «дефектной» границы раздела сред (свободная или скользящая) и от «бездефектной» (жёсткой) границы, т. е. $\rho_1 C_1 / \rho_2 C_2 < 5$, где ρ_i и C_i – плотность и скорость контактирующих материалов; а также и наличие проникшего в расслоение полимер-металл слоя жидкости; б) высокий коэффициент затухания звука в мегагерцовом диапазоне частот; в) выявление дефектных областей площадью $S_D \approx 10 \text{ мм}^2$; г) наличие на внешней поверхности полимера зарезов, царапин и других повреждений, вызывающих рассеяние падающей волны при отражении.

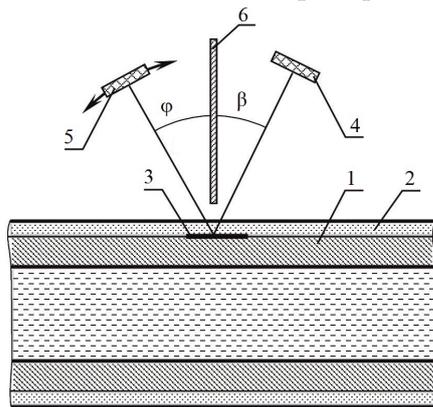


Рисунок 6 – Контроль морских труб на наличие отслоений изолирующего покрытия: 1 – труба; 2 – покрытие; 3 – дефект; 4 – излучающий ПЭП; 5 – приёмный ПЭП; 6 – звукоизолирующая перегородка

Figure 6 – Inspection of offshore pipes for the presence of delamination of the insulating coating: 1 – pipe; 2 – coating; 3 – defect; 4 – radiating converter; 5 – receiving transducer; 6 – soundproofing partition

Указанные факторы существенно осложняют задачу по обнаружению таких дефектов стандартными методами при одностороннем доступе. На рисунке 6 представлена предлагаемая схема акустического зондирования объекта с помощью приёмного (5) и излучающего (4) ПЭП, разделённых акустическим экраном. При этом угол падения волны выбран таким, чтобы разница фаз отражённого акустического луча от дефектной (скользящей) и недефектной (жёсткой) границы составляла $\Delta\phi \approx \pi$, а также учитывался ход изменения коэффициентов отражения в зависимости от угла падения β . Апертуру ПЭП, частоту f , углы приёма УВ выбирают согласно предложенному выше способу. При этом в качестве зондирующих выбраны рабочие частоты 0,4–0,5 МГц.

В данном случае для достижения максимальной чувствительности контроля используется принцип измерений, основанный на приёме акустического сигнала, отражённого от границы сред под двумя углами: $\phi_1 = \beta$ – постоянный угол; ϕ_2 – угол одного из боковых максимумов основного лепестка раскрытия поля рассеяния, «расщеплённого» при отражении акустического луча от неоднородной границы. В этом случае достигается чувствительность контроля, составляющая 30–40 мм².

Контроль биметаллических соединений

При контроле покрытия подшипников скольжения теплоэнергетического оборудования проведена разработка раздельно-совмещённых ПЭП, позволяющая проводить контроль качества сцепления оловянно-свинцового покрытия с такими основами, как латунь, чугун и сталь с чувствительностью до 4–5 мм². В отличие от стандартных ПЭП, применяемых на производстве и работающих в контактном варианте, нами предложены универсальные ПЭП, позволяющие обеспечить контроль широкого ассортимента подшипников радиусом от 35 мм и более с помощью одного ПЭП, а ввод-приём УВ производится через локальную иммерсионную ванну. При этом нет необходимости осуществлять притирку ПЭП под радиус внутренней поверхности изделия разной номенклатуры подшипников. Второе отличие заключается в том, что контроль проводится с использованием опорного сигнала, регулируемого по величине специальной разделительной вставкой. Тем самым обеспечивается высокая стабильность акустического контакта

по сравнению со стандартными ПЭП. В третьих, благодаря указанным выше свойствам конструкции ПЭП представляется возможным со значительно большей надёжностью и чувствительностью ($4\text{--}5\text{ мм}^2$) обеспечить выявление дефектов расслоения, практически устранив влияние шумового фона, создаваемого несплошностями в латунной или чугунной основе, находящимися в окрестности границы раздела сред. С помощью таких устройств может быть легко механизирован или автоматизирован процесс контроля указанных подшипников.

Подобные ПЭП внедрены в механизированной установке для контроля качества сцепления напылённого покрытия автомобильных рессор. Из-за высокого шумового фона, создаваемого при вводе УВ в покрытие и передаваемого на приёмный ПЭП, для зондирования границы сцепления материалов было невозможно использование стандартных раздельно-совмещенных ПЭП. Использование именно предложенных конструкций ПЭП позволило практически на $15\text{--}20\text{ дБ}$ снизить уровень шумового фона, обеспечив обнаружение мест несцепления материалов площадью $4\text{--}5\text{ мм}^2$.

Контроль протяжённых подповерхностных дефектов в объектах с грубо обработанной поверхностью

Одна из важных и нерешённых проблем технологии обработки объектов чугунного, стального, цветного литья, а также полимерных композиций связана с необходимостью выявления на ранней стадии технологического процесса обработки изделия подповерхностных несплошностей в виде раковин, непроклеев. Одностороннее же выявление протяжённых подповерхностных дефектов с плохой отражающей способностью и грубо обработанной поверхностью весьма затруднительно с помощью традиционных способов и средств контроля. Это обусловлено попаданием рассеянного сигнала в мёртвую зону приёмного ПЭП, которая весьма «растянута» в результате прохождения (отражения) импульса через шероховатую поверхность и отражения от неровной границы несплошности. При решении этой задачи (рисунок 7) существенно нивелируется влияние шумового фона на полезный сигнал увеличением длины волны в объекте, а также обеспечиваются условия $-\lambda/Rz > 10$, $\varepsilon = \lambda/h > 4\text{--}5$, при которых будет наблюдаться отличие

коэффициентов отражения и фазовый сдвиг отражённых волн, где h – оценочное расстояние от несплошности до поверхности объекта.

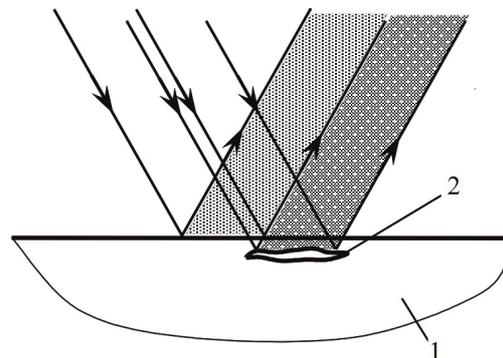


Рисунок 7 – Иллюстрация к выявлению протяжённых дефектов, расположенных вблизи поверхности объекта: 1 – изделие с грубо обработанной поверхностью; 2 – протяжённый дефект

Figure 7 – Illustration to identify extended defects located near the surface of the object: 1 – product with a rough surface; 2 – extended defect

Предварительные экспериментальные данные показали принципиальную возможность контроля указанных объектов, что дает основания для более детальной разработки теоретической модели применительно к решению важной прикладной проблемы дефектоскопии чугунных, стальных отливок, а также других подобных объектов с грубо обработанной поверхностью.

Заключение

На основе теоретического анализа и численных расчётов выявлены закономерности формирования полей рассеяния в трёхмерном пространстве при перемещении пятна зондирующего акустического луча через границу полубесконечного дефекта сцепления материалов, отражённые волны от которого обладают фазовым сдвигом, варьируемым в диапазоне $(0,25\text{--}1)\pi$.

Установлены условия, обеспечивающие максимальную чувствительность предложенного метода выявления дефектов со слабой отражающей способностью, заключающиеся в организации приёма рассеянных волн в меридианной плоскости под углами первоначальных экстремумов первого и более порядков и характерном значении экваториального угла, амплитудная зависимость от которого имеет осциллирующий вид.

Данные экспериментального моделирования, выполненные для случая рассеяния

продольных волн, а также волн Рэлея от границы с модельным дефектом типа полубесконечная полоса, находятся в хорошем качественном соответствии с расчётными данными.

Результаты исследований предложено использовать для ряда практических приложений, включая контроль качества сцепления полимерных и порошковых покрытий на стальных объектах, паяных баббитовых покрытий на латунном и чугунном основаниях подшипников скольжения, а также обнаружения подповерхностных дефектов в объектах с грубо обработанной поверхностью и высоким затуханием звука (например, в чугунах).

Благодарности

Настоящая работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т19-136 от 02.05.2019 г.

Список использованных источников

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. – М.: Машиностроение, 2003. – 864 с.
2. Kruger, S.E. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound / S.E. Kruger [et al.] // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Golden, Colorado, 22–27 July 2007. – Vol. 27A. – P. 279–285. DOI: 10.1063/1.2902670
3. Kim, H.-J. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves / H.-J. Kim [et al.] // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Golden, Colorado, 22–27 July 2007. – Vol. 27B – P. 1066–1073. DOI: 10.1063/1.2902550
4. Chambers, J.K. Bound line analysis using swept-frequency ultrasonic spectroscopy / J.K. Chambers, J.R. Tucker // *Insight*. – 1999. – Vol. 41, no. 3. – P. 151–155.
5. Santo, J.B. Ultrasonic interferometry for the evaluation of thickness and adhesion of thin layers / J.B. Santo, M.J. Santon // *Abstracts of 4th International Conference on NDT, China, Greece, 2007*, 22 p.
6. Abbakumov, K.E. Influence of a loss in the acoustic contact on the propagation of Stoneley waves near the boundary between solid half-spaces / K.E. Abbakumov, R.S. Konovalov // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2008. – Vol. 44, no. 3. – P. 196–201. DOI: 10.1134/S1061830908030054
7. Adam'yan, Y.E. Detecting transverse material boundaries in multilayer anthropogenic structures / Y.E. Adam'yan [et al.] // *Russian Journal of Nondestructive*

Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 4. – P. 185–196.

DOI: 10.1134/S106183091604001X

8. Murashov, V.V. Revealing cracks in polymer-composite parts and in multilayered glued constructions by a low-frequency acoustic method / V.V. Murashov, M.V. Slyusarev // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2016. – Vol. 52, no. 6. – P. 324–331.

DOI: 10.1134/S1061830916060061

9. Баев, А.Р. Патент РБ на изобретение. Способ ультразвукового контроля качества склеивания материалов. № 15036 от 8.06.09 зарег. 19.07.11. – 2011.

10. Baev, A.R. Features of the ultrasonic waves reflection from inhomogeneous boundary of contacting solids / A.R. Baev, A.L. Mayorov, M.V. Asadchaya // *Materials of 10th European Conf. on NDT, Moscow, 2010*. – P. 234–240.

Acknowledgments

This work was carried out with the support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract No. T19-136 of 02.05.2019.

References

1. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik [Non-destructive testing: Reference], vol. 3, ed. V.V. Klyuyev, Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003, 864 p.
2. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27A, pp. 279–285. DOI: 10.1063/1.2902670
3. Kim H.-J., Song S.-J., Kim D.-Y., Kwon S.-D. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27B, pp. 1066–1073. DOI: 10.1063/1.2902550
4. Chambers J.K., Tucker J.R. Bound line analysis using swept-frequency ultrasonic spectroscopy. *Insight*, 1999, vol. 41, no. 3, pp. 151–155.
5. Santo J.B., Santon M.J. Ultrasonic interferometry for the evaluation of thickness and adhesion of thin layers. *Abstracts of 4th International Conference on NDT, China, Greece, 2007*, 22 p.
6. Abbakumov K.Ye., Konovalov R.S. Influence of disturbance of acoustic contact on the propagation of Stoneley waves near the boundary of solid half-spaces. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 196–201. DOI: 10.1134/S1061830908030054
7. Adamyan Yu.E., Belov A.A. Detecting transverse material boundaries in multilayer anthropogenic structures *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 185–196. DOI: 10.1134/S106183091604001X

8. Murashov, V.V., Slyusarev M.V. Revealing cracks in polymer-composite parts and in multilayered glued constructions by a low-frequency acoustic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 324–331. **DOI:** 10.1134/S1061830916060061

9. Bayev A.R. *Sposob ul'trazvukovogo kontrolya kachestva skleivaniya materialov* [Method for ultrasonic

quality control of bonding materials]. Patent RB, no. 15036, 2011.

10. Baev A.R., Mayorov A.L., Asadchaya M.V. Features of the ultrasonic waves reflection from inhomogeneous boundary of contacting solids. *Materials of 10th European Conf. on NDT, Moscow, 2010*, pp. 234–240.

Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search

R.V. Fiodortsev¹, A.R. Silie Cuenca^{1,2}, D.A. Kozhevnikov¹, V.M. Medina², R. Delgado³

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

²National Experimental University “Antonio José de Sucre” UNEXPO
Corpahuaiaco avenue, Barquisimeto – Lara, 3001 Venezuela

³Bolivarian Agency for Space Activities ABAE
Francisco Fajardo Avenue, Generalissimo Francisco de Miranda Air Base, La Carlota, Caracas 1064 Venezuela

Received 19.08.2019

Accepted for publication 22.11.2019

Abstract

The object of the study is software methods of the Earth surface images processing obtained from the *VRSS-2* satellite to determine the spectral composition of the vegetation cover to detect the presence of carotenoids during prolonged exposure to hydrocarbons.

The photosynthetic pigments of higher plants (chlorophylls, carotenoids and phytobiliproteins) were analyzed. In the chloroplasts of higher plants, chlorophyll and carotenoids are present in a ratio of about 3:1. The presence of hydrocarbons increases the amount of carotenoids. Carotenoids have absorption bands in the blue-violet region from 400 to 500 nm and a high reflection coefficient in the red-orange and yellow spectral regions, which corresponds to the multispectral *MSS* operating mode (B2) of the *VRSS-2* satellite camera. An analysis of the vegetation growing in the study area of the Puerto Kumarebo settlement showed that the best indicator of the presence of hydrocarbons in the soil is *Prosopis juliflora* – *CUJI* with a deep root system of up to 50 m, growing in the study area.

Using ENVI software, a comparative evaluation of the efficiency of photographs image processing was carried out using the normalized relative vegetation index (*NDVI*) and the structure-insensitive pigment index (*SIFI*) to detect changes in the color of green vegetation. It has been established that the *SIFI* index is more applicable for hydrocarbon search tasks. Moreover, the recorded index fluctuations in the area of uniform vegetation at the level of 2.5 % are characteristic of normal growing conditions and cannot serve as evidence of the presence of factors indicating the presence of hydrocarbons in the soil. For a more detailed assessment of the presence of carotenoids in the foliage and the presence of hydrocarbons in the soil, photographs with high optical resolution of objects on the surface are required.

Keywords: carotenoids, hydrocarbons, photographs, satellite, ENVI.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

Адрес для переписки:

Р.В. Фёдорцев
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: feodrw@gmail.com; dmkz.1408@gmail.com

Address for correspondence:

R.V. Fiodortsev
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: feodrw@gmail.com; dmkz.1408@gmail.com

Для цитирования:

R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A. Kozhevnikov, V.M. Medina,
R. Delgado.

Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon
Field Search.

Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 4. – С. 373–381.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

For citation:

R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A. Kozhevnikov,
V.M. Medina, R. Delgado.

Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon
Field Search.

Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 4, pp. 373–381.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

УДК 535.015, 535.422

Применение методов обработки изображений фотоснимков со спутников при поиске месторождений углеводородов

Р.В. Фёдорцев¹, А.Р. Силие Куэнсо^{1,2}, Д.А. Кожевников¹, Медина Виктор Мануэль²,
Р. Делгадо³

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

²Национальный экспериментальный политехнический университет имени Антонио Хосе де Сукре, UNEXPO
пр-т Корпахуайко, Баркисимето - Лара 3001, Венесуэла

³Боливарианское агентство космической деятельности АВАЕ
пр-т Франсиско Фахардо, Авиабаза генералиссимуса Франсиско де Миранда,
Ла Карлота, Каракас 1064, Венесуэла

Поступила 19.08.2019

Принята к печати 22.11.2019

Объектом исследования являются программные методы обработки изображений участков земной поверхности, полученные со спутника VRSS-2, для определения спектрального состава растительного покрова на предмет обнаружения присутствия каротиноидов при длительном воздействии углеводородов.

Проведен анализ фотосинтетических пигментов высших растений (хлорофиллов, каротиноидов и фитобилипротеинов). В хлоропластах высших растений хлорофилл и каротиноиды присутствует в соотношении примерно 3:1. Присутствие углеводородов увеличивает количество каротиноидов. Каротиноиды имеют полосы поглощения в сине-фиолетовой области от 400 до 500 нм и высокий коэффициент отражения в красно-оранжевой и желтой области спектра, что соответствует мульти-спектральному *MSS* режиму работы (B2) фотокамеры спутника *VRSS-2*. Анализ растительности, произрастающей в исследуемом районе населенного пункта Пуэрто-Кумаребо показал, что наилучшим индикатором наличия углеводородов в почве может являться *Prosopis juliflora* – *CUJI* с глубокой корневой системой до 50 м, произрастающая в исследуемом районе.

При использовании программного обеспечения *ENVI* проведена сравнительная оценка эффективности обработки изображений фотоснимков с применением нормализованного относительного индекса растительности (*NDVI*) и индекса пигмента, не чувствительного к структуре (*SIPi*) на предмет обнаружения изменений в цветовой окраске зелёной растительности. Установлено, что для задач поиска углеводородов более применимым является индекс *SIPi*. При этом зафиксированные флуктуации индекса в области равномерной растительности на уровне 2,5 % характерны для нормальных условий произрастания и не могут служить доказательством наличия факторов, свидетельствующих о наличии в почве углеводородов. Для более детальной оценки присутствия каротиноидов в листве и наличия углеводородов в почве, требуются фотоснимки с большим оптическим разрешением объектов на поверхности.

Ключевые слова: каротиноиды, углеводороды, фотографии, спутник, *ENVI*.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

Адрес для переписки:

Р.В. Фёдорцев
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: feodrw@gmail.com; dmz.1408@gmail.com

Address for correspondence:

R.V. Fiodortsev
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: feodrw@gmail.com; dmz.1408@gmail.com

Для цитирования:

R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A. Kozhevnikov, V.M. Medina,
R. Delgado.

Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon
Field Search.

Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 373–381.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

For citation:

R.V. Fiodortsev, A.R. Silie Cuenca, D.A. Kozhevnikov,
V.M. Medina, R. Delgado.

Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon
Field Search.

Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 373–381.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-373-381

Introduction

Most effective and reliable of the existing methods of searching for oil and gas is remote sensing of the earth (RS) in the visible and infrared ranges. Filming in the visible range of the spectrum is used to solve the problems of predicting structural traps and evaluating explosive violations. Seismic exploration is still required to estimate hydrocarbon deposits. The probability of discovering new deposits ranges from 0.5 (for poorly studied) to 0.9 (for well-studied) territories. Based on experiments, it was found that in the presence of a small amount of hydrocarbon migrating from deposits to the Earth's surface and accumulating in the soil, in the root system of plants, chemical transformations occur, leading to a change in the number of carotenoids and a change in the color of the leaves. This effect is called "blue shift" and recorded in a relatively narrow spectral range (of the order of 10–20 nm). It is most effectively recorded on hyperspectral images obtained from satellites, for example, EO-1 (Hyperion) and others [1].

The purpose of the research is a comparative analysis of various software image processing methods by comparing the normalized relative vegetation index (*NDVI*) and the structure-insensitive pigment index (*SIPi*) to determine their effectiveness in detecting changes in the color of green vegetation.

Object of study

In this work, the object of the study was software methods for processing images of the earth's surface obtained from the *VRSS-2* satellite to determine the spectral composition of the vegetation cover to detect the presence of carotenoids during prolonged exposure to hydrocarbons.

Typical elemental composition of oil includes: 82–87 % C (carbon); 11.0–14.5 % H (hydrogen); 0.01–6.0 % S (sulfur); 0.001–1.8 % N (nitrogen); 0.005–0.35 % O (oxygen), etc.

Each of the listed elements or their combination has a specific effect on vegetation. Under the prolonged influence of sulfur dioxide, the leaves turn yellow, necrosis forms, and the frost resistance of tree buds decreases. Nitrogen dioxide in large quantities reduces the resistance of plants and leads to their poisoning (leaves become brown). Photochemical reactions taking place with the participation of nitrogen dioxide and hydrocarbons under the action of solar radiation leads to the formation of both

peroxide compounds with toxic effects and ozone. The latter slows down photosynthesis in plants and weakens their viability, which leads to a decrease in plant biomass [2].

Photosynthetic pigments, which absorb the energy of light in photosynthesis reactions, are indicators of such processes. There are three main types of photopigments: chlorophyll, carotenoids and phytobiliproteins. Plant chlorophyll includes four species a, b, c and d. Higher plants contain both a and b, chlorophyll c and d are present in algae, and photosynthetic bacteria contain bacteriochlorophyll. In addition to absorbing and transmitting light energy, fat-soluble carotenoid pigments can also dissipate energy in strong light and have a photoprotective effect that protects chlorophyll from damage. Chlorophyll and carotenoids are always present together in the chloroplasts of higher plants in a ratio of about 3:1. In autumn or in a poor environment, chlorophyll in the leaves decomposes more easily, and its amount decreases, and carotenoids are relatively stable. Carotenoids have absorption bands in the blue-violet region from 400 to 500 nm. They do not absorb red-orange and yellow light and therefore look orange or yellow.

Figure 1 shows the absorption spectra of the most common pure photopigments: chlorophyll A bacteria (curve 1), chlorophyll A plants (curve 2), chlorophyll B (curve 3), β -carotene (curve 5) and phycoerythrobilin (curve 4) [3].

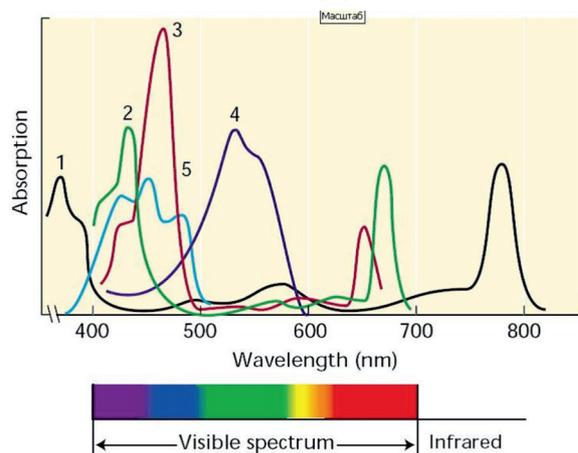


Figure 1 – Spectral characteristics of plant photopigments: 1 – chlorophyll A bacteria; 2 – chlorophyll A plants; 3 – chlorophyll B; 4 – phycoerythrobilin; 5 – β -carotene

Three groups of compounds belong to carotenoids [4]:

- 1) orange or red carotene pigments ($C_{40}H_{56}$);
- 2) yellow xanthophylls ($C_{40}H_{56}O_2$ and $C_{40}H_{51}O_4$);

3) carotenoid acids – oxidation products of carotenoids with a shortened chain and carboxyl groups (for example, $C_{20}H_{24}O_2$ – crocetin having two carboxyl groups).

The mild tropical and subequatorial climate, as well as favorable weather conditions in Venezuela, contribute to the great diversity of vegetation growing on its territory. The air temperature changes little during the year, the differences in the seasons are the amount of precipitation. Only in the studied northern part of Venezuela – the state of Falcón grows about 30 species of trees. To analyze the presence of hydrocarbons in the soil from growing plant species, it is advisable to consider those that differ in a deeply developed root system.

A detailed analysis showed that the following four types are best suited:

- (Bursera tomentosa – Caricarito, Isicagua de burro),
- (Capparis odoratissima – Olivo),

- (Prosopis juliflora – CUJI) root system: light, 1–2 processes, up to 7 m wide and 15 to 50 m deep,
- (Conocarpus erectus – Mangle botón) root system: the processes are lateral and thin, weak and fragile, have cork bark.

Correlation of image quality of photographs with physical parameters of the Earth's atmosphere

Images from the *VRSS-2* satellite provided by the Bolivarian Agency for Space Activities ABAE were used as initial data for image processing. The satellite passes over Venezuela three or four times every 24 hours, covering the same area in 101 days in Nadir [5]. The satellite contains two different cameras: a high resolution camera (HRC) and an infrared camera (IRC). The highest resolution is 0.98 m GSD in panchromatic mode and 4 m GSD in the multispectral range (Table).

Table

Spectral ranges of *VRSS-2* cameras

Designation	Multispectral MSS, nm	Short wave infrared IRC-1, nm	Long wave infrared IRC-2, μm	Panchromatic PAN, nm
B1	450–520	900–1100	10,3–11,3	500–800
B2	520–590	1180–1300	11,5–12,5	–
B3	630–690	1550–1700	–	–
B4	770–890	–	–	–

Infrared cameras have a resolution of 60 m (long wave channel) and GSD 30 m (short wave channel), which is 10 spectral ranges.

ABAE's standard *VRSS-2* products consist of a quantitative, calibrated and scaled series of digital levels (DNs) that represent multispectral image data obtained using HRC (high-resolution camera) and IRC (infrared camera). HRC sensor ranges (PAN and MSS) and IRC are displayed in 10 bits in unencrypted format and can be scaled to reflectance and/or upper atmosphere (TOA) values. Radiometric correction includes the restoration of lines or pixels lost when shooting, in addition to correcting the image strip. Spectral radiation or brightness level is determined from the expression:

$$L_{\lambda} = \frac{DN}{K_{band}} - \frac{B_{band}}{K_{band}}; \quad (1)$$

$$L_{\lambda} = \frac{DN}{K_{band}} - \frac{C_{band}}{K_{band}}; \quad (2)$$

where L_{λ} – spectral radiation (W/m^2 cf. microns); DN – digital value of the image. The digital level (DN) is a numerical value that encodes each pixel and determines the intensity of the display of a gray or color image on the monitor screen.

B_{band} , C_{band} and K_{band} – scale factors for each band present in the metadata. The values of the constants B , C , and K of the radiometric coefficients are indicated in the metadata file in the Calibration Parameters block, together with a set of loaded bands.

When obtaining brightness values, it can be used repeatedly to continue the calculation of reflectivity, which allows to obtain more accurate results for vegetation indices determining.

The following equation is used to convert the digital levels (DN) to reflectance values (TOA) in the upper atmosphere obtained by the IRC-2 sensor:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta}; \quad (3)$$

where ρ_λ – spectral reflectance; d – distance from Earth to the Sun in astronomical units – $UA = 149597870$; $ESUN_\lambda$ – solar radiation (W/m^2 microns); $\theta = 51.853^\circ$ – sunny elevation.

In this case, the brightness temperature (T) is determined by the expression:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}, \quad (K),$$

where K_2 – thermal constant for each band present in the metadata (K); K_1 – thermal constant for each band present in the metadata (W/m^2 cf. microns).

In particular, for the IRC-2 sensor, the current values of thermal constants are presented in the metadata in the section of thermal constants.

Selecting a hydrocarbon search area and satellite images

There are four oil basins in Venezuela: Maracaibo (the largest field in the north-west of the country); Apure Falcon; Oriental. The following deposits have been discovered: Shelf Bolivar, Bombal, Karabobo, Tukupita, Khunin (Figure 2) [6].



Figure 2 – The layout of hydrocarbon deposits in the Republic of Venezuela

Figure 3 shows an image of the area around Puerto Kumarebo, the capital of the Zamora municipality of Falcon, Venezuela. The coordinates of the place are N $11^\circ29'16.19''$ O $69^\circ21'7.99''$. The Kumarebo Field is located in the northern part of Falcon, 42 km east of the city of Coro and 5 km south of the Caribbean Sea, Tucupido. This field is located in the central-eastern sector of the Falcon Basin, east of the La Vela anticline and west of the Ricoa structure. The oil discovered in the Kumarebo field is ultra-light and has excellent quality (density $0.78\text{--}0.82\text{ g/cm}^3$, gas condensate on average 47.5°

API). Some sediments contain 65° API condensate. Currently, Kumarebo has 13,000 active wells, production of which provides 1,885 million barrels per day. This region is geologically connected with the basin of Lake Maracaibo [7].

Software methods for processing satellite images

Today, the market has a fairly large number of commercial (paid) software designed for processing and analysis of Earth remote sensing

data. The most famous software products and raster graphic editors include: ERDAS-Imagine (USA), IDRISI (USA), ENVI (USA), Socet-GXP (USA), eCognition (Germany), ER Mapper (Austria), PCI Geomatica (Canada) and others. The performance and functionality of each package is due to

advances in computer technology, which is mainly determined by the need for efficient processing of large amounts of data. Many of these software products are compatible with the platform of the Windows operating system [8]. The cost of these programs varies from \$25,000 to \$100,000.



Figure 3 – Puerto Kumarebo Photographic Area for the Search for Hydrocarbons

An alternative approach is the development of free open source software for building geographic information systems (GIS), which has accelerated significantly in recent years. The most common are: GRASS-GIS (USA), gvSIG (Espanola), InterImage (USA), ILWIS-Open (Germany), Opticks (Ball Aerospace & Technologies Corp. USA), ORFEO Toolbox (OTB) (France), PolSARPro (France), Sentinel Toolbox (France), Quantum GIS and SCP-QGIS (Plugin) (USA), SAGA-GIS (Germany), Sentinel Hub QGIS (Plugin) (Slovenia), SoPI (Argentina), Whitebox Geospatial Analysis Tools (Canada), ePhoto Z300 and others. The specified software has a number of functionalities for working with Earth remote sensing data: calculation of statistics and histograms, filtering, classification, correction and segmentation of satellite images, detection of changes, calculation of vegetation indices and monitoring of fires, changes in land use of the land cover, modeling of changes in the earth coating [9].

Research was conducted using *ENVI* software.

The ratio of the studied spectral parameters and color coordinates of the photograph

To carry out a spectral analysis of images obtained from a spacecraft in panchromatic and monochromatic modes, it is necessary to pre-calibrate the studied wavelength relative to the color coordinates in the RGB system (Figure 4).

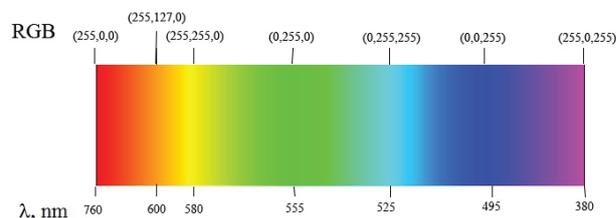


Figure 4 – Correspondence of the visible region of the spectrum to the RGB color system

To date, there are a fairly large number of different conversion techniques. In our case Dan Bruton's *NetPBM* software (based on *FORTRAN*) was used, taking into account the width, height, depth and gamma of the original image in the RGB

system and its linear interpolation relative to a given wavelength [10].

Selection of vegetation status assessment index

Classical methods for estimating the amount of photosynthetically active biomass are carried out through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). This index can take values from -1 to 1 , calculated by the absorption and reflection by the plants of the rays of the red and near infrared zones of the spectrum. The calculation of the majority of vegetation indices is based on the two most stable (independent of other factors) sections of the curve of the spectral reflectivity of plants. The red zone of the spectrum ($0.62\text{--}0.75\ \mu\text{m}$) accounts for the maximum absorption of solar radiation by chlorophyll, and the near infrared zone ($0.75\text{--}1.3\ \mu\text{m}$) has the maximum energy reflection of the leaf cell structure. High photosynthetic activity (usually associated with a large phytomass of vegetation) leads to lower values of reflection coefficients in the red zone of the spectrum and large values in the near infrared region of the spectrum. The ratio of these indicators to each other allows you to clearly separate the vegetation from other natural objects [11].

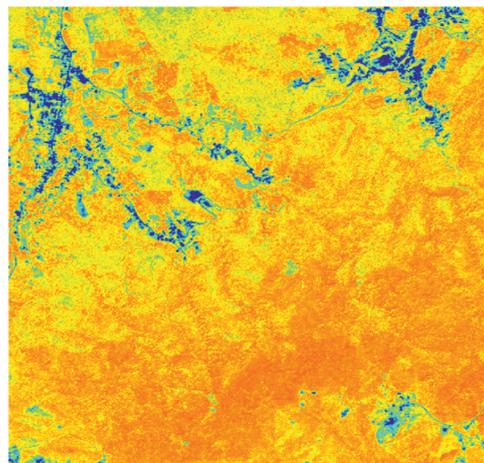
Figure 5 shows a fragment of the image of the Earth's surface (N $11^{\circ}29'$ – N $11^{\circ}25'$; W $69^{\circ}25'$ – W $69^{\circ}20'$) obtained by *VRSS-2*. The frame highlights the area ($5000 \times 4000\ \text{m}$) selected for the analysis of vegetation for the presence of hydrocarbons in the soil. Together with the forest in the region there are cities and roads, which will qualitatively assess the applicability of vegetation indices.

Figure 5 shows an array of the obtained *NDVI* indices at different limits of the range. For healthy and dense vegetation, the index value equal to $NDVI = 0.5\text{--}0.8$ is considered to be typical.

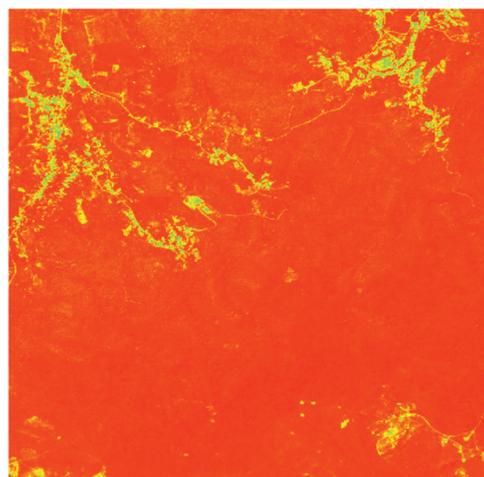


Figure 5 – Image fragment from *VRSS-2* (area southwest of Puerto Kumarebo)

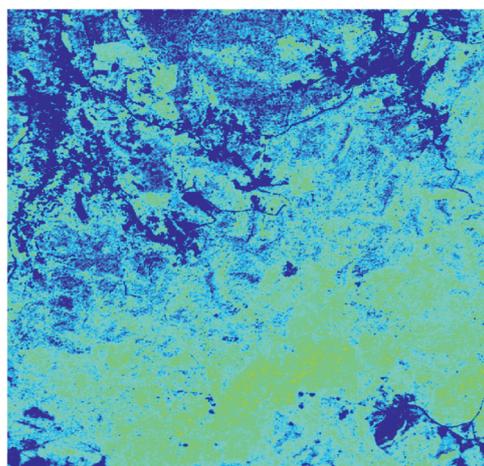
Three ranges of the index were chosen for evaluation: $-1.0 \dots 1.0$ (Figure 6a); $0 \dots 1.0$ (Figure 6b); $0.5 \dots 1.0$ (Figure 6c).



a



b



c

Figure 6 – Arrays of *NDVI* indices of the selected area with different contrasts: a – $(-1,0)\dots 1,0$; b – $0\dots 1,0$; c – $0,5\dots 1,0$

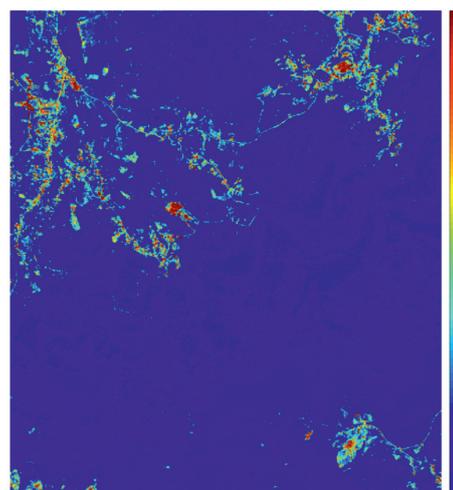
In Figure 6a (in the upper part) in blue, significant areas of cities and roads are clearly distinguished – the lower boundary of the contrast. Against this background, areas of vegetation merge into a single massif (yellow-orange zone). For a more detailed assessment of the area of the plant mass, the contrast range was narrowed initially to 0...1 (Figure 6b) and subsequently to a narrower range of 0.5...1 (Figure 6c). Analysis of the last image shows that the vegetation in this area has a heterogeneous color; however, for a more detailed assessment of the presence of carotenoids in the foliage and the presence of hydrocarbons in the soil, photographs with a high optical resolution of objects on the surface are required.

For this area, a comparative analysis of the efficiency of displaying the state of vegetation by the pigment index that is not sensitive to the SIPI structure (Structure Insensitive Pigment Index) was carried out. This index is used to monitor the condition of plants in regions with a high variability of the canopy structure or leaf area index, for early detection of plant diseases or other causes of stress. The ratio of volumetric carotenoids to chlorophyll is determined by the general formula:

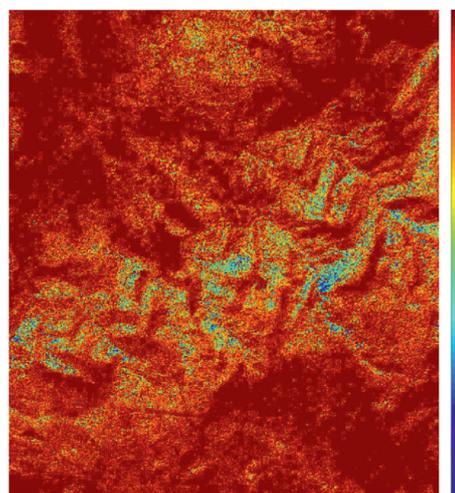
$$\text{SIPI} = (\text{NIR} - \text{blue}) / (\text{NIR} - \text{red}).$$

The overall SIPI range is from 0 to 2. High SIPI values (increased carotenoid content and decreased chlorophyll content) are often indicative of plant disease, which is associated with loss of chlorophyll in plants. Moreover, for healthy vegetation, the index value varies from 0.8 to 1.8.

Figure 7 shows an array of SIPI indices with different contrast values: 0–2.0 and 0.95–1.0. An analysis of Figure 7a shows that the areas of cities and roads have a significantly larger index value (yellow-green and red zones), similar to the data obtained in Figure 4a for NDVI, and a lower uniform value for the area with predominant vegetation (blue zone). Increasing the lower border of the contrast of the SIPI index to 0.95–1.0 (Figure 7b) allows almost completely eliminating the urban infrastructure (red-brown zone) and highlighting areas with heterogeneous green vegetation (yellow-green and blue zones) on the forest. However, with absolute changes within 2.5%, one cannot unequivocally express the possibility of the influence of soil hydrocarbons on this index.



a



b

Figure 7 – Arrays of SIPI indices of the selected area at different contrasts: a – 0–2,0; b – 0,95–1,0

As can be seen from Figure 7b, the SIPI index is uneven over the forest area, which indicates a different state of vegetation.

Conclusion

Using ENVI software, a comparative evaluation of the efficiency of image processing of photographs was carried out using the normalized relative vegetation index and the structure-insensitive pigment index (SIPI) to detect changes in the color of green vegetation. It was found that the SIPI index is more applicable for hydrocarbon search tasks. Moreover, the recorded index fluctuations in the area of uniform vegetation at the level of 2.5% are characteristic of normal growing conditions and cannot serve as evidence of the presence of factors indicating the presence of hydrocarbons in the soil. For a more

detailed assessment of the presence of carotenoids in the foliage and the presence of hydrocarbons in the soil, photographs with high optical resolution of objects on the surface are required.

An analysis of vegetation species with a deep root system that grows in the studied region of Puerto Kumarebo (Venezuela), which best reflect the presence of chemical elements in the soil – indicators of hydrocarbons.

References

1. Trofimov D.M. Remote sensing: new technologies – new opportunities for oil and gas exploration. *Geomatics*, 2009, no.1, pp. 17–24.
2. Aerosols of Siberia. Integration projects. Ed. K.P. Kutsenogogo. *FSUE Publishing House SB RAS*, 2006, iss. 9. – 555 p.
3. Lincoln Taiz, Eduardo Zeider. *Plant Physiology*. *Sinauer Associates*, 2002, chapter 7, 690 p. (P. 115). ISBN: 0878938230.
4. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. *Geometry*, 2009, no. 3, pp. 28–32.
5. VRSS-2 or Antonio José de Sucre is Venezuela. <https://www.n2yo.com/satellite/?s=42954>
6. Mountain Encyclopedia / Ch. ed. E.A. Kozlovsky; Ed. col.: M.I. Agoshkov, N.K. Baibakov, A.S. Boldyrev et al. *Sov. encyclopedia, Geosystem*, 1984, vol. 1, 560 p.
7. Renny Calleja. Cuenca geológica Falcón en Venezuela. Parte 2. Monografía. CUENCA PETROLÍFERA DE FALCÓN. UNIVERSIDAD DEL ZULIA, 2002, 28 p. https://rdv-files.nyc3.cdn.digitaloceanspaces.com/pub/pdf/files_pdf/5/8/5/00031585.pdf
8. Al-Wassai F.A., Kalyankar N.V. Image fusion technologies in commercial remote sensing packages. *Journal of Global Research in Computer Science*, 2013, 4(5), pp. 44–50.
9. Quirós E., Polo M.E. Recursos abiertos de información geográfica para investigación y documentación científica. *Revista Española de Documentación Científica*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 126–138. DOI: 10.3989/redc.2018.3.1512
10. Dan Bruton. Approximate RGB values for Visible Wavelengths, 1996. Internet: <http://www.physics.sfasu.edu/astro/color/spectra.html>
11. Spectral Indexes on Top of NDVI To Make Your Vegetation Analysis Complete. Earth Observing System EOS. 22.02.2019. https://eos.com/blog/6-spectral-indexes-on-top-of-ndvi-to-make-your-vegetation-analysis-complete/?utm_source=Email&utm_medium=educationalcontent&utm_campaign=button

УДК 614.842

Методика исследования динамики параметров задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение

А.А. Антошин¹, В.И. Никитин^{1,2}

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

²Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь

Поступила 01.10.2019

Принята к печати 21.11.2019

Существующие методы контроля работоспособности мультикритериальных пожарных извещателей не предусматривают проверку их характеристик в условиях перехода тления в пламенное горение. Целью работы являлась разработка методики исследования параметров окружающей среды при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение для моделирования тестового пожара при проверке качества работы мультикритериальных пожарных извещателей.

Разработана методика проведения исследований параметров окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения и горение листов мятой и гладкой бумаги.

Впервые исследованы изменения концентрации угарного газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение подготовленных образцов древесины и мятой бумаги.

Показано, что контролируемые параметры окружающей среды при переходе от тления пиролиза в пламенное горение изменяются одновременно. Установлено, что при переходе от пиролиза к пламенному горению древесины наблюдается уменьшение в 2,4 раза скорости роста рассеивающей способности дыма, скорость увеличения удельной оптической плотности и концентрации угарного газа увеличиваются в 2 и в 5,3 раза соответственно.

Ключевые слова: мультикритериальные пожарные извещатели, методы контроля, работоспособность, переход тления в пламенное горение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Адрес для переписки:

А.А. Антошин
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Address for correspondence:

A.A. Antoshyn
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Для цитирования:

А.А. Антошин, В.И. Никитин.
Методика исследования динамики изменения параметров задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение. Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 4. – С. 382–390.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

For citation:

A.A. Antoshyn, V.I. Nikitin.
[Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 382–390 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion

A.A. Antoshyn¹, V.I. Nikitin^{1,2}

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

²Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations
of the Republic of Belarus
Soltysa str., 183a, Minsk 220046, Belarus

Received 01.10.2019

Accepted for publication 21.11.2019

Abstract

The existing methods for monitoring the performance of multi-criteria fire detectors do not provide for verification of their characteristics in the conditions of transition from smoldering to flame burning. The aim of the work is the development of the research methods of the environmental parameters during the transition from smoldering (pyrolysis) to flame combustion for simulation a test fire while checking the quality of multi-criteria fire detectors.

A technique to conduct research of environmental parameters under conditions of heating wood samples of different sizes to a temperature of selfignition and burning crumpled and smooth paper has been developed.

Changes in the concentration of carbon monoxide, specific optical density, and scattering ability during the transition from smoldering (pyrolysis) to flame burning of prepared wood and crumpled paper were studied for the first time.

It is shown that the controlled environmental parameters during the transition from smoldering pyrolysis to flame burning change together. Conclusion: the speed of growth of the scattering ability of smoke decreases by 2.4 times, the speed of increase in the specific optical density and concentration of carbon monoxide increases by 2 and 5.3 times (respec-tively), during the transition from pyrolysis to flame burning of wood.

Keywords: multicriteria fire detectors, control methods, operability, transition of smoldering to flame burning.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Адрес для переписки:

А.А. Антошин
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Address for correspondence:

A.A. Antoshyn
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Для цитирования:

А.А. Антошин, В.И. Никитин.
Методика исследования динамики изменения параметров
задымлённой среды при переходе пиролиза в пламенное горение.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 382–390.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

For citation:

A.A. Antoshyn, V.I. Nikitin.
[Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky
Environment Parameters during the Transition
of Pyrolysis to Flame Combustion].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 382–390 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-382-390

Введение

Известно, что мультикритериальные пожарные извещатели успешно внедряются во всём мире, так как способны обнаруживать пожар с высокой достоверностью. Отличие мультикритериального извещателя от комбинированного заключается в наличии у него сложного алгоритма обработки информации по сравнению с простой логикой «ИЛИ» у комбинированных пожарных извещателей [1].

Согласно данным, приведённым в работах [2] и [3] существующие алгоритмы работы мультикритериального извещателя основаны на логике «И», при которой также оценивается динамика изменения одного из контролируемых факторов пожара и усиливается чувствительность остальных сенсоров.

Определение мультикритериального детектора по *NFPA 72* [4] включает в себя требование о наличии сложного алгоритма обработки информации и, кроме того, выделяется основной обнаруживаемый фактор.

Таким образом, в алгоритме работы мультикритериального извещателя предусматривается выдача одного сигнала о пожаре при стабильном развитии одного типа горения, например, тление или пламенное горение. Однако не учитываются нестандартные ситуации развития пожара, а именно случаи горения с переходом одного типа горения в другой.

Переходной процесс от тления к пламенному горению исследовался в работе [5]. Авторы исследовали переходной процесс от тления к пламенному горению писчей бумаги. Для указанного переходного процесса характерны резкие изменения параметров окружающей среды:

- резкое увеличение температуры на потолке испытательной камеры при воспламенении бумаги;
- резкое снижение значений интенсивности рассеянного света;
- резкое увеличение коэффициента светопропускания.

Указанный переходной процесс может быть неверно идентифицирован мультикритериальными пожарными извещателями. К примеру, при пожаре после снижения плотности дыма может возникнуть пламенное горение, что может не учитываться извещателем и он может сигнализировать о прекращении горения (локализации и затухании).

Испытания по тестовому пожару, имитирующему такой сложный процесс перехода тления в пламенное горение, необходимо обязательно предусмотреть для оценки качества мультикритериальных извещателей.

В испытаниях пожарных извещателей широко используются стандартные тестовые пожары [6–9, *]. Во всех случаях каждый тестовый пожар моделирует один из типов горения и не предусматривает проверку работы извещателей при переходе от тления к пламенному горению.

Хорошо известно, что пламенное горение твердых горючих материалов начинается с термического разложения, в результате которого образуются горючие газы, которые при нагреве воспламеняются. Процесс термического разложения материала может сопровождаться достаточно большим тепловыделением, что может привести к тлению. Тление при определённых условиях может перейти в пламенное горение [10].

Примеры материалов, склонных к тлеющему горению, условия, необходимые для возникновения тлеющего горения, а также условия перехода от тления к пламенному горению описаны в [11, 12].

Изучение процесса тления и условий, при которых возможен процесс тления, проводилось в [13].

В работе [11] проанализировано распространение тления вдоль целлюлозных материалов. Выделены 3 области волны горения при тлении:

- зона пиролиза, характеризующаяся резким подъёмом температуры, где происходит истечение видимых летучих продуктов из исходного материала;
- зона углистого остатка, где температура достигает максимума, и прекращается эволюция видимых продуктов пиролиза, и начинается накаливание;
- зона сильнопористого углистого остатка, где остаток больше не нагревается и температура падает.

Только пористые материалы, которые при нагревании образуют твёрдый углистый остаток, могут претерпевать самостоятельно поддерживаемое тлеющее горение [12].

Пламенное горение может установиться на поверхности твёрдого вещества лишь в том

* – ГОСТ Р 57552-2017 «Техника пожарная. Извещатели пожарные мультикритериальные. Общие технические требования и методы испытаний».

случае, если скорость выделения летучих продуктов превзойдет определённую критическую скорость. Для достижения температур, необходимых для этого, требуется большое количество времени [12].

Однако во всех указанных работах изучались только температура и скорость перехода от тления к пламенному горению. При этом остались не изученными такие параметры окружающей среды, как: оптическая плотность, рассеивающая способность, концентрация угарного газа.

Целью настоящей работы являлась разработка методики исследования параметров окружающей среды при переходе от тления (пиролиза) в пламенное горение для моделирования тестового пожара для проверки качества мультикритериальных извещателей.

Методика проведения исследований

В работе исследовано изменение характеристик окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения и горение листов мятой и гладкой бумаги. Измерялись концентрация угарного газа (СО), удельная оптическая плотность и поток оптического излучения, рассеянный на углы от 11 до 15°, а также температура на нагревательной поверхности электроплитки, на потолке испытательной камеры и на входе в вытяжной канал. Исследования проводились в испытательной камере размером 2 × 2 × 2,5 м с вытяжным каналом сечением 600 × 380 мм (рисунок 1). В вытяжном канале устанавливаются датчики угарного газа и измерительная система для измерения оптических характеристик газовой среды. На полу испытательной камеры устанавливалась электроплита, мощностью 2 кВт, диаметром 220 мм с восьмью концентрическими каналами глубиной 2 мм и шириной 5 мм каждая. Поверхность плиты нагревалась до 600 °С.

В качестве топлива для тестовых пожаров использовались образцы древесины, а также листы мятой и гладкой бумаги с параметрами, приведенными в таблице 1.

В качестве средств измерения параметров окружающей среды при горении тестовых пожаров использовались: газоанализатор дымовых газов *Multilyzer NG* (с погрешностью 5 % от измеренной величины); установка «Дымовой канал», позволяющая моделировать пожары в условиях, приближенных к реальным пожарам в бытовых помеще-

ниях [14]. Установка «Дымовой канал» включает в себя измеритель-регулятор «Сосна-004» термоэлектрическим преобразователем ТХА(К)-1199, имеющим диапазон измерения от – 50 °С до + 500 °С и измерительный узел установки для измерения оптических характеристик дыма (удельной оптической плотности и величины потока оптического излучения, рассеянного частицами дыма).

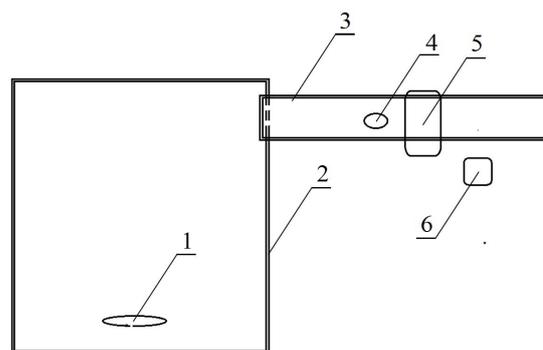


Рисунок 1 – Испытательная камера и места расположения оборудования и средств измерений: 1 – нагревательная плитка; 2 – испытательная камера; 3 – вытяжной канал; 4 – место установки газоанализатора; 5 – оптический измерительный узел; 6 – измеритель температуры

Figure 1 – Test chamber with equipment locations and measuring instruments: 1 – heating plate; 2 – test chamber; 3 – exhaust duct; 4 – gas analyzer installation site; 5 – optical measuring unit; 6 – temperature meter

Таблица 1 / Table 1

Характеристики топлива для тестовых пожаров

Characteristics of fuel for test fires

Номер образца Sample Number	Вид топлива Type of fuel	Размеры, мм Sizes, mm	Масса, г Mass, g
1	ель/spruce	2 × 10 × 75	14
2	осина/aspen	3,5 × 10 × 75	13,7
3	осина/aspen	6 × 10 × 75	13,5
4	осина/aspen	20 × 20 × 75	11,5
5	писчая бумага мятая wrinkled paper	формат А4 A4 format	4,5
6	писчая бумага гладкая smooth writing paper	формат А4 A4 format	50

Для измерения рассеянного излучения использовалась установка для измерения рассеянного излучения по методу Шифрина [15]. Установка регистрирует излучение, рассеянное под углами от 3° до 11° , а также излучение прошедшее через исследуемую среду без рассеяния. Имеется возможность фокусировать оптическое излучение, рассеянное под углами от 3° до 11° на фотоприёмнике, расположенном за фокусом объектива. Таким образом, измеряется интегральная характеристика оптического излучения, рассеянного на углы от 3 до 11° . Измерение интенсивности прошедшего через исследуемую среду оптического излучения позволяет определять оптическую плотность газовой среды, содержащей аэрозоль разной природы.

Для измерения температуры на потолке, на входе в вытяжной канал и на плитке устанавливались термопары, которые подключались к измерителю-регулятору «Сосна-004».

Электроплитка при включении постепенно нагревалась до максимальной температуры (около 600°C).

Для моделирования режима перехода от тления к пламенному горению образцы древесины и листы мятой бумаги располагались равномерно на электроплитке, температура которой не превышала температуру окружающей среды. После этого включалась электроплитка, температура на которой постоянно повышалась. Рост температуры за 14 мин составил 480°C .

Изменение температуры фиксировалось каждые 30 с термопарой, уложенной в один из концентрических каналов на электроплитке. Одновременно фиксировались температура на входе в вытяжной канал и температура под потолком испытательной камеры (высота потолка 2,4 м) на оси пожара. Температура воздуха в начале эксперимента составляла 18°C .

На расстоянии 4 м от оси пожара в дымовом канале проводились измерения удельной оптической плотности и рассеянного излучения. Расстояние, которое проходило зондирующее излучение поперёк дымового канала, составляло 600 мм. Скорость воздушного потока измерялась на входе в канал и была равна примерно 0,2 м/с. Измерение удельной оптической плотности и рассеянного излучения с помощью измерительного узла установки для измерения оптических характеристик дыма проводилось также через каждые 30 с в течение 14 мин с момента начала нагрева электроплитки.

Исследование характеристик

Изменения концентрации угарного газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности при нагреве образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец № 1), приведены на рисунке 2.

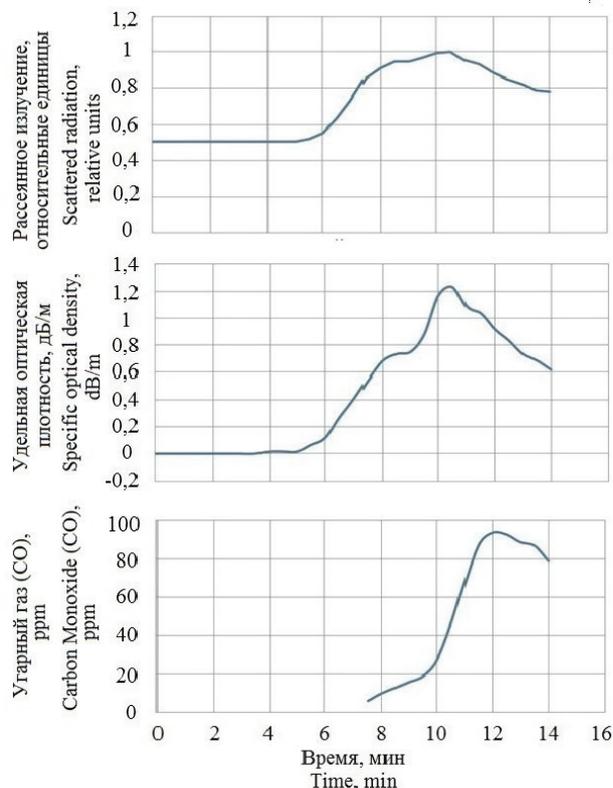


Рисунок 2 – Изменения рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа при нагреве деревянных брусочков размера $2 \times 10 \times 75$ мм

Figure 2 – Changes of scattered radiation, specific optical density, carbon monoxide concentration when heating wooden blocks with dimensions of $2 \times 10 \times 75$ mm

При нагревании плитки, начиная с 5 минуты при температуре на ней 275°C и выше, наблюдалось постепенное увеличение потока рассеянного излучения и значений удельной оптической плотности.

Наличие угарного газа CO также фиксировалось, начиная с 7,5 минуты, что обусловлено некоторой инерционностью (до 60 с согласно паспорту) в фиксировании значений газоанализатором дымовых газов *Multilyzer NG*.

Из рисунка 2 видно, что:

1. Происходило равномерное увеличение следующих параметров до определённого времени:

– изменение удельной оптической плотности (от 0 до 0,68 дБ/м) до 8 минуты;

– изменение потока рассеянного излучения (от 0,5 до 0,85 отн. ед.) до 7,5 минуты;

– изменение концентрации угарного газа (СО) (до 19 ppm) до 9,5 минуты.

2. Изменения контролируемых параметров имели иной, более плавный во времени, характер:

– начиная с 8 и до 9,5 минуты для удельной оптической плотности (изменения от 0,68 до 0,88 дБ/м);

– начиная с 7,5 минуты до 10,5 минуты для рассеянного излучения (изменения от 0,85 до 1 отн.ед.).

При этом с 8,5 минуты вплоть до 9 минуты (период около 30 с) удельная оптическая плотность (около 0,75 дБ/м) и рассеянное излучение (0,95 отн. ед.) существенно не изменялись.

3. Возобновление резкого изменения удельной оптической плотности началось с 9,5 минуты вплоть до 10,5 минуты (630 с) (изменения оптической плотности с 0,88 дБ/м до 1,23 дБ/м).

Изменения температуры на плитке, на потолке испытательной камеры и на входе в вытяжной канал представлены на рисунке 3.

Воспламенение образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец № 1) наблюдалось при температуре поверхности плиты около 400 °С.

Удельная оптическая плотность после 10,5 минуты начала снижаться. В отношении динамики изменения значений угарного газа (СО) отметим, что начиная с 9,5 минуты до 12 минуты концентрация угарного газа (СО) увеличивается по линейной зависимости (с 19 до 94 ppm). После 12 минуты начинается уменьшение концентрации угарного газа (СО).

При нагревании образцов толщиной более 2-х мм и образцов мятой бумаги (№ 2–5) их воспламенения не наблюдалось, но при этом обнаружена зависимость концентрации угарного газа от исходной толщины образца. Чем толще образец, тем позднее и при большей температуре на поверхности плиты появлялся угарный газ.

В случае тления гладкой бумаги удельная оптическая плотность достигала значения 4 дБ/м через 520 с. В первые 260 с, пока температура бумаги не достигла значения температуры тления, происходит медленное изменение оптических характеристик среды под потолком, удельная оптическая плотность при этом достигает значения 0,2 дБ/м. Достигнув температуры тления, за последующие 260 с, удельная оптическая плотность увеличивается до 4 дБ/м. Медленный незначительный рост температуры

до момента самовоспламенения бумаги в основном определяется тепловыделением электроплиты. Одновременно быстро нарастает интенсивность рассеянного излучения. После самовоспламенения бумаги начинается быстрый рост температуры и одновременно уменьшается удельная оптическая плотность и интенсивность рассеянного излучения [5].

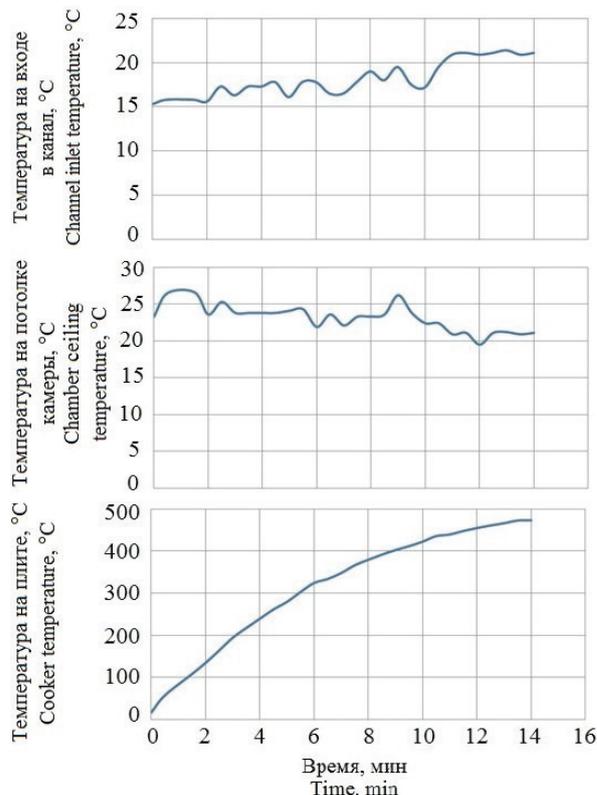


Рисунок 3 – Изменения температуры на плитке, вблизи потолка камеры и на входе в вытяжной канал

Figure 3 – Temperature changes on the plate, near the ceiling of the chamber and at the entrance to the exhaust duct

Анализируя рисунок 4, делаем вывод, что переходной процесс от тления к пламенному горению гладкой бумаги описывается следующими зависимостями:

- резкое увеличение температуры на потолке испытательной камеры при воспламенении бумаги;
- резкое снижение значений интенсивности рассеянного света;
- резкое увеличение коэффициента светопропускания.

Количественные значения динамики изменения контролируемых параметров во времени при нагревании образцов древесины толщиной 2 мм для этапов пиролиза и пламенного горения приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Скорость изменения потока рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа окружающей среды в помещении на этапах пиролиза и пламенного горения

Speed of change of scattered radiation flux, specific optical density, carbon monoxide concentration the environmental parameters in the room at the stages of pyrolysis and flame combustion

Контролируемые параметры окружающей среды Controlled environmental parameters	Скорость изменения параметра на этапе пиролиза The rate of change of the parameter at the stage of pyrolysis	Скорость изменения параметра на этапе пламенного горения The rate of change of the parameter at the stage of flame combustion
Поток рассеянного излучения Scattered radiation flux	0,140 мин ⁻¹ /min ⁻¹	0,058 мин ⁻¹ /min ⁻¹
Удельная оптическая плотность Specific gravity	0,204 (дБ/м) мин ⁻¹ /(dB/m) min ⁻¹	0,416 (дБ/м) мин ⁻¹ /(dB/m) min ⁻¹
Концентрация угарного газа Carbon monoxide concentration	6,5 ppm мин ⁻¹ /min ⁻¹	34,5 ppm мин ⁻¹ /ppm min ⁻¹

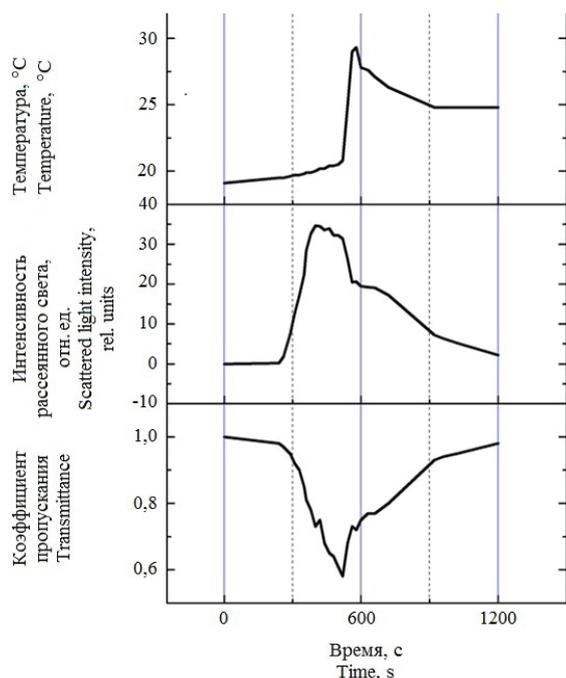


Рисунок 4 – Изменение временных зависимостей температуры под потолком помещения, интенсивности рассеянного излучения и коэффициента пропускания среды при переходе пиролиза (до 520 с) в пламенное горение бумаги

Figure 4 – Change in the time dependences of the temperature under the ceiling of the room, the intensity of the scattered radiation and the coefficient of transmittance of the medium during the transition from pyrolysis (up to 520 s) to flame burning of paper

В результате сравнения результатов, полученных в данной работе при нагревании образцов древесины толщиной 2 мм, с результатами работы [5], делаем следующие выводы:

– первый этап нагрева (пиролиза) образцов древесины так же, как и образцов гладкой бумаги, характеризуется одновременным нарастанием значений потока рассеянного излучения, удельной оптической плотности, а также концентрации угарного газа (для гладкой бумаги измерения СО не проводились);

– второй этап пламенного горения (с 8 до 10,5 мин – для образцов из древесины, с 520 до 570 с – для образцов гладкой бумаги) характеризуется одновременными (в пределах погрешности измерений) более резкими изменениями удельной оптической плотности и концентрации угарного газа, а также более плавными изменениями скорости нарастания рассеянного излучения;

– третий этап затухания характеризуется одновременным уменьшением значений всех контролируемых параметров.

Заключение

Разработана методика, с помощью которой впервые выполнено одновременное исследование динамики изменения концентрации угарного

газа, удельной оптической плотности, рассеивающей способности в одной и той же области окружающей среды, содержащей продукты горения, при переходе пиролиза в пламенное горение древесины и писчей бумаги. Измерения выполнялись в области среды, расположенной на расстоянии от оси пожара, характерном для положения пожарных извещателей.

Показано, что вблизи потолка помещения на удалении от оси пожара, соответствующему максимально возможному расстоянию от оси пожара до извещателя, в исследовании оно составляло 4 м, при переходе пиролиза в пламенное горение древесины и листов пищевой бумаги концентрация угарного газа, температура, удельная оптическая плотность и рассеивающая способность окружающей среды, содержащей продукты горения, изменяются одновременно.

Установлено, что при переходе от пиролиза к пламенному горению древесины наблюдается уменьшение в 2,4 раза скорости роста рассеивающей способности дыма, скорость увеличения удельной оптической плотности и концентрации угарного газа увеличиваются в 2 и в 5,3 раза соответственно.

Список использованных источников

1. Членов, А.Н. Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя / А.Н. Членов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 12. – С. 55–60.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60

2. Здор, В.Л. Мультикритериальные пожарные извещатели. Перспективы применения // Пожарная безопасность. – 2015. – № 2. – С. 113–117.

3. Неплохов, И. Пожарные извещатели: XXI век / И. Неплохов [и др.] // Технологии защиты. – 2017. – № 4. – С. 20–25.

4. NFPA 72-2013 National Fire Alarm Code 2013 Edition.

5. Зуйков, И.Е. Измерение характеристик воздуха в верхней зоне помещения при горении бумажной продукции / И.Е. Зуйков [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1(8). – С. 68–72.

DOI: 10.21122/2220-9506-2014-0-1-122-123

6. Баканов, В. Мультикритериальные пожарные извещатели по российским и европейским стандартам / В. Баканов // Технологии защиты. – 2014. – № 3. – С. 73–77.

7. Скорфилд, С. Мультисенсор – эффективное решение проблемы ложных срабатываний систем по-

жарной сигнализации / С. Скорфилд // Системы безопасности. – 2006. – № 5. – С. 128–132.

8. EN 54-7 «Fire detection and fire alarm systems – Part 7: Smoke detectors – Point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization».

9. EN 54-31 «Fire detection and fire alarm systems – Part 31: Multi-sensor fire detectors – Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors».

10. Киреев, А.А. Исследование повторного воспламенения древесины, обработанной гелеобразующими огнетушащими составами / А.А. Киреев, С.Н. Бондаренко // Проблемы пожарной безопасности. Вып. 25. – Харьков: УГЗУ. – 2009. – С. 65–72.

11. Драйздел, Д. Введение в динамику пожаров / под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

12. Исследование пожаров, связанных с источником малой мощности (в виде тлеющего табачного изделия). – Красноярск: СЭУ ФПС ИПЛ по Кк, 2014. – 13 с.

13. Козлитин, А.А. Развитие пожара от источника зажигания малой мощности / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых // Научный вестник НИИ ГД «Респиратор». – 2016. – № 4. – С. 43–50.

14. Зуйков, И.Е. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития / И.Е. Зуйков // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. / под ред. Н.П. Мигуна. – Минск: Институт прикладной физики НАН Беларуси. – 2011. – С. 197–202.

15. Зуйков, И.Е. Контроль концентрации дыма при проведении испытаний дымовых оптических точечных пожарных извещателей / И.Е. Зуйков // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2009. – № 2(26). – С. 17–29.

References

1. Chlenov A.N., Butskinskaya T.A., Zhuravlev S.Yu., Nikolaev V.A. [About the efficiency of the multi-criteria fire detector]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2016, vol. 25, no. 12, pp. 55–60 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.55-60

2. Zdor V.L. [Multi-criteria fire detectors. Prospects of use]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2015, no 2, pp. 113–117 (in Russian).

3. Neplokhov I., Afanasyev V. [Fire detectors: XXI century]. *Tekhnologii zashchity* [Protection Technologies], 2017, no. 4, pp. 20–25 (in Russian).

4. NFPA 72-2013 National Fire Alarm Code 2013 Edition.

5. Zuykov I.E., Antoshin A.A., Esipovich D.L., Olefir G.I. [Measurement of air characteristics in the

upper zone of a room when burning paper products]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2014, no. 1(8), pp. 68–72 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2014-0-1-122-123

6. Bakanov V. [Multi-criteria fire detectors according to Russian and European standards]. *Tekhnologii zashchity* [Protection Technologies], 2014, no. 3, pp. 73–77 (in Russian).

7. Scorfield S. [Multisensor – an effective solution to the problem of false alarms of fire alarm systems]. *Sistemy bezopasnosti* [Security Systems], 2006, no. 5, pp. 128–132 (in Russian).

8. EN 54-7 "Fire detection and fire alarm systems - Part 7: Smoke detectors – Point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization".

9. EN 54-31 "Fire detection and fire alarm systems - Part 31: Multi-sensor fire detectors – Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors".

10. Kireev A.A., Bondarenko S.N. [The study of repeated inflammation of wood treated with gelling extin-guishing agents]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti* [Problems of fire safety]. Kharkov: Ural State Pedagogical University, 2009, vol. 25, pp. 65–72 (in Russian).

11. Dreisdel D. *Vvedenie v dinamiku pozharov* [Introduction to the dynamics of fires]. Ed. Yu.A. Koshmarov, V.E. Makarov. Moscow: Stroyizdat Publ., 1990, 424 p.

12. Investigation of fires associated with a source of low power (in the form of a smoldering tobacco product): Method. allowance. Krasnoyarsk: SEU FPS IPL according to Kk, 2014, 13 p.

13. Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N. [Fire development from a low power ignition source]. *Nauchnyj vestnik NII GD "Respirator"* [Scientific Herald of the Research Institute of State Duma "Respirator"], 2016, no. 4, pp. 43–50 (in Russian).

14. Zuikov I.E. [Device for Modelling of Early Stages of Fire Development. Collection of Scientific Papers]. *Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrolya i technicheskoy diagnostiki*, ed. N.P. Migun. Minsk, Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus, 2011, pp. 197–202 (in Russian).

15. Zuikov I.E. [Control of smoke concentration during testing of smoke optical point detectors]. *Chrezvychajnye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya* [Emergencies: prevention and response], 2009, no. 2(26), pp. 17–29 (in Russian).

УДК 614.841

Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена

А.И. Кицак

*НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь*

Поступила 26.02.2019

Принята к печати 01.09.2019

Целью работы являлась разработка модели теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене для выявления оптимальных условий тушения порошками пожаров подкласса А1.

Достижение поставленной цели осуществлялось методом экспериментального и математического моделирования процесса тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг пожара. Получены экспериментальные зависимости времени тушения и удельного расхода огнетушащего порошка от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении пожара подкласса А1 локально по площади и локально в ограниченном объёме.

Анализ полученных закономерностей тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения при кратковременном воздействии на очаг возгорания показал наличие оптимальной величины интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону пожара, при которой реализуется минимальный удельный расход порошка на тушение пожара. Наличие данного оптимума связано с инерционностью теплового механизма тушения пожара подкласса А1 порошками вследствие конечности времени передачи тепла, запасённого при пожаре, частицам огнетушащего порошка и ограниченности времени взаимодействия частиц с горючим материалом.

Проведён теоретический анализ процесса тушения пожара по площади с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене. Результаты анализа качественно согласуются с результатами экспериментального изучения закономерностей тушения по площади модельных очагов пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения.

Ключевые слова: пожар подкласса А1, огнетушащий порошок, нестационарная теплопередача, постоянная времени инерционности процесса, время взаимодействия.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Адрес для переписки:

А.И. Кицак
НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
МЧС Республики Беларусь,
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Address for correspondence:

A.I. Kitsak
Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Для цитирования:

А.И. Кицак.
Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 391–401.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

For citation:

A.I. Kitsak.
[Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 391–401 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions

A.I. Kitsak

Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus

Received 26.02.2019

Accepted for publication 01.09.2019

Abstract

The aim of the paper was to develop a model of thermal extinguishing mechanism using dry chemical powder taking into account the inertia of heat transfer to powder particles during unsteady heat exchange to identify the optimal conditions for extinguishing of A1 class fires with powders.

The method of experimental and mathematical modelling of fire extinguishing process using dry chemical powder with short-term effect on the fire was used to achieve the goal. The experimental dependences of the extinguishing time and unit consumption of the extinguishing powder on the intensity of the powder supply to the combustion zone in extinguishing of subclass A1 fire in same area and in a limited volume were obtained. The mathematical model of a thermal extinguishing mechanism using dry chemical powder has been developed, taking into account the inertia of heat transfer to powder particles during unsteady heat exchange.

Analysis of the regularities of extinguishing the subclass A1 fire using powder with a short feeding it into the fire indicates the presence of optimum values of unity consumption of powder on the fire from the intensity of feeding it into the fire. The presence of this optimum is due to the inertia of extinguishing the subclass A1 fire using powder due to the finiteness of the heat transfer time to the particles of the extinguishing powder and the limited time of interaction of particles with the combustible material.

The theoretical analysis of the fire extinguishing process over the area taking into account the inertia of heat transfer to the powder particles at non-stationary heat exchange are carried out. The results of the analysis are in qualitative agreement with the results of the experimental study of the regularities of extinguishing of model fire foci of subclass A1 with General-purpose fire extinguishing powder.

Keywords: A1 subclass fire, dry chemical powder, non-stationary heat exchange, inertia process time constant, interaction time.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Адрес для переписки:

А.И. Кицак
НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций
МЧС Республики Беларусь,
ул. Сольтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Address for correspondence:

A.I. Kitsak
Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry
for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
Soltys str., 183a, Minsk 220046, Belarus
e-mail: kitsak48@yandex.ru

Для цитирования:

А.И. Кицак.
Модель теплового механизма тушения пожара подкласса
А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях
нестационарного теплообмена.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 4. – С. 391–401.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

For citation:

A.I. Kitsak.
[Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing
with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary
Heat Exchange Conditions].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 4, pp. 391–401 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401

Введение

Особенностью тушения пожаров подкласса А1 огнетушащими порошками общего назначения является возможность повторного воспламенения горючего вещества после воздействия порошка. Повторное воспламенение происходит вследствие появления скрытого горения (тления) несгоревших остатков целлюлозосодержащих материалов, которое возникает благодаря большому количеству тепла, аккумулированному в них, и наличию кислорода, содержащегося в порах данных материалов.

Задачей тушения пожаров подкласса А1 является подавление как пламенного горения, так и характерного для них скрытого горения (тления). Первая часть этой задачи легко решается огнетушащими порошками благодаря наличию в них гомогенного и гетерогенного механизмов ингибирования (прерывания) цепных реакций горения вещества. Проблема состоит в подавлении скрытого горения. Данный тип горения может быть прекращён либо изолированием горючего материала от доступа кислорода, либо эффективным охлаждением его.

При тушении углеродосодержащего горючего материала порошками рекомендуется применять огнетушащие порошки на основе фосфорно-аммонийных солей, способных при нагревании образовывать на обгорелой углеродистой поверхности тонкую плёнку расплава полифосфатов, изолирующую углеводородный состав от доступа кислорода. Данный процесс сопровождается также охлаждением горючего материала вследствие траты части тепла на нагрев, плавление и испарение частиц порошка, попавших на горячий углистый слой.

Условия протекания и эффективность различных механизмов тушения пожаров огнетушащими порошками (охлаждение зоны горения уменьшением теплоотдачи от него или увеличением теплоотвода от горючего вещества) изучались в основном в задачах тушения порошками горения газов и жидкостей [1–2].

Оценки вклада теплового механизма в тушение газов, приведённые в работах [1, 3], показали, что он отбирает от пламени $\approx 15\%$ тепла. В этих же работах указывается на важность учёта при оценке эффективности теплового механизма тушения пламени времени взаимодействия частиц порошка с фронтом пламени в связи с инерционностью передачи тепла.

Анализ литературных данных по исследованию эффективности тушения порошками пожаров подкласса А1 показал, что данная проблема малоизученна. Малочисленные исследования по данной тематике касались экспериментального определения времени повторного воспламенения древесины после воздействия водных и гелеобразующих огнетушащих сред заданного удельного веса [3]. В работе [4] рассмотрена тепловая модель тушения огнетушащим порошком твёрдых горючих материалов (ТГМ) при стационарном теплообмене между нагретой поверхностью горячего материала и поверхностью частиц порошка. Практически не затрагивались вопросы поиска условий и технологии тушения пожаров класса А1 огнетушащими порошками при ограниченных временах воздействия на горючий материал, например, в случае тушения пожаров подкласса А1 широко используемыми в настоящее время модульными установками порошкового пожаротушения (УПП).

В связи с вышеизложенным и отсутствием целенаправленных исследований в области применения порошков для тушения пожаров подкласса А1 при кратковременном воздействии на очаг возгорания, актуальным является определение оптимальных режимов подачи порошка в очаг пожара для эффективного тушения пожара. Поскольку стадия охлаждения горючего материала (с образованием изолирующей плёнки расплава или без неё) является достаточным условием тушения пожаров подкласса А1, важным является также разработка модели теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка при нестационарном теплообмене с целью определения оптимальных условий подачи порошка в очаг пожара и теплофизических характеристик частиц порошка, обеспечивающих эффективное тушение пожара.

Результаты экспериментальных исследований эффективности тушения пожара подкласса А1 по площади и в объёме огнетушащим порошком общего назначения при различных режимах подачи его в зону пожара

Различают два основных способа тушения пожаров огнетушащими порошками: тушение пожара по защищаемой площади и в защищаемом объёме. Отличие данных способов состоит

в том, что в первом случае создаётся огнетушащая концентрация порошка, способная потушить пожар в любой точке защищаемой площади, а во втором – в любой точке защищаемого объёма. Под защищаемой площадью понимается вся площадь помещения, занимаемая пожарной нагрузкой, либо часть её (тушение локально по площади). Защищаемый объём – это весь объём помещения, в котором расположена пожарная нагрузка, или часть объёма, занимаемая пожарной нагрузкой (тушение локально по объёму).

Для исследования эффективности тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения была изготовлена лабораторная установка, моделирующая условия тушения пожара модулями порошкового пожаротушения кратковременного воздействия.

Установка была выполнена в виде цилиндрической ёмкости, образованной двумя металлическими кольцами, перемещающимися по вертикальным направляющим. Сверху установки крепился ресивер для накопления воздушной смеси с определённым давлением. Выход ресивера соединялся через электромагнитный клапан с узлом крепления резервуара с огнетушащим порошком. Под установкой располагался поддон для сбора выпущенного из резервуара огнетушащего порошка и размещения модельного очага пожара. Процесс выпуска порошка заданной массы из выходного отверстия резервуара регистрировался скоростной видеокамерой через смотровое окно установки.

Максимальное давление воздуха, создаваемое в ресивере установки, равнялось 1 МПа. Максимальные защищаемые площадь и объём установки равны $0,5 \text{ м}^2$ и 1 м^3 соответственно.

В ходе экспериментов исследовались зависимости времени тушения модельного очага пожара подкласса А1 и удельного расхода на тушение огнетушащего порошка от интенсивности подачи его в зону горения при тушении пожара локально по площади и локально в объёме.

Тушение пожара локально по площади осуществлялось, когда нижнее кольцо установки было приподнято вверх и струя порошка направлялась непосредственно в очаг пожара. При тушении пожара локально по объёму подвижное кольцо установки опускалось до соприкосновения с поддоном. Подача порошка в закрытый объём производилась через специальные

распылители, позволявшие быстро заполнить порошком весь объём установки.

Для проведения исследований использовался модельный очаг пожара ранга 0,1А по ГОСТ Р 51057-2001. Он располагался на подставке высотой ≈ 200 мм непосредственно под выходным отверстием резервуара УПП с огнетушащим порошком. Зажигание очага пожара осуществлялось по методике ГОСТ Р 51057-2001. Более подробная информация о методике проведённых экспериментальных исследований отражена в работе [5].

Тушение пожара осуществлялось огнетушащим порошком марки «Вексон АВС-25». В ходе экспериментов контролировалась температура деревянных брусков, расположенных в верхнем и нижнем рядах модельного очага пожара. Контроль температур осуществлялся двумя измерителями-регуляторами «Сосна-002» ТПЗ*ХА.

После подачи с заданным давлением огнетушащего порошка определённой массы в зону очага пожара фиксировалось время повторного воспламенения очага либо время его тушения. Время повторного воспламенения приравнивалось промежутку времени от момента подачи порошка в очаг пожара до появления повторного воспламенения. В отсутствие повторного воспламенения очаг пожара считался потушенным. Время тушения приравнивалось сумме времени подачи порошка в очаг пожара и времени остывания горючего материала. Время остывания горючего материала отсчитывалось от момента прекращения пламенного горения до времени, когда температура горючего материала снижалась до температуры начала его пиролиза (≈ 200 °С для древесины).

Результаты исследования эффективности тушения очагов пожара ранга 0,1А в зависимости от интенсивности подачи огнетушащего порошка в зону горения при тушении по площади и в объёме представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Кривые 1 на рисунках отображают зависимости времени тушения пожаров τ от интенсивности подачи огнетушащего порошка J в зону горения. Видно, что время тушения пожара в начале кривых быстро уменьшается с увеличением интенсивности подачи порошка, а затем стабилизируется.

Кривые 2 характеризуют зависимости удельного расхода порошка G , затраченного на тушение пожара, от интенсивности подачи его в зону горения.

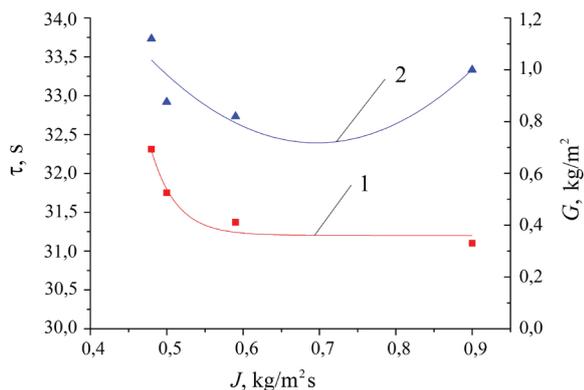


Рисунок 1 – Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода огнетушащего порошка (2) от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара ранга 0,1А локально по площади

Figure 1 – Dependence of the extinguishing time (1) and specific flow rate of fire extinguishing powder (2) on the intensity of powder supply to the combustion zone when extinguishing the source model of 0.1A fire on the surface

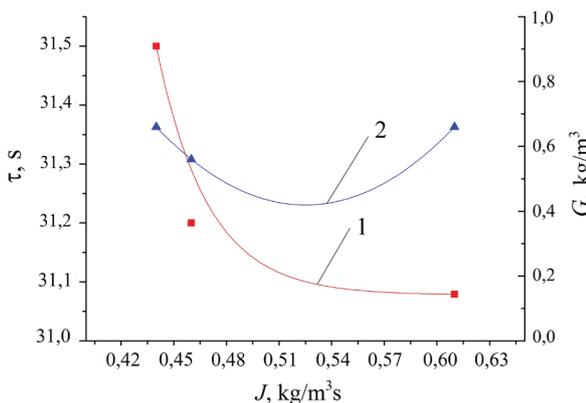


Рисунок 2 – Зависимость времени тушения (1) и удельного расхода огнетушащего порошка (2) от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара ранга 0,1А в объёме

Figure 2 – Dependence of the time of (1) and the specific consumption of fire extinguishing powder (2) from a flow rate of powder in the combustion zone under simulation of the rank of 0.1A fire extinguish in the volume

Из вида данных зависимостей следует наличие экстремального (минимального) значения удельного расхода, применяемого для тушения очага пожара 0,1А огнетушащего порошка. При тушении пожара по площади это значение равно $\approx 0,8 \text{ кг/м}^2$ при интенсивности подачи, близкой к $0,6 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$. В случае тушения очага пожара данного ранга в объёме минимальное значение удельного расхода порошка, требуемое для тушения пожара,

равно $\approx 0,45 \text{ кг/м}^3$ и реализуется при интенсивности подачи порошка в зону горения $0,52 \text{ кг/(м}^3\text{с)}$.

Полученный результат отражает проявление в схеме тушения пожара подкласса А1 порошковыми системами с ограниченным временем воздействия классической закономерности, выражающейся в наличии оптимальной интенсивности подачи огнетушащего вещества (пены, мелкодисперсной воды, огнетушащих газов) в зону очага возгорания, при которой обеспечивается минимальный удельный расход его на тушение пожара [6–8].

Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 по площади огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на очаг пожара

Как указывалось ранее, при тушении пожаров подкласса А1 огнетушащими порошками проявляется несколько механизмов тушения. Это гомогенное и гетерогенное ингибирование пламенного горения в результате разбавления продуктов горения элементами терморазложения частиц порошка и прерывания цепных реакций окисления вследствие восстановления активных окислителей на поверхности частиц порошка. Наряду с данными механизмами присутствует также механизм охлаждения зоны реакций вследствие поглощения тепла частицами порошка.

Длительность процесса гетерогенного ингибирования активных центров пожара очень мала. Она составляет $\approx 10^{-4} \text{ с}$ [1]. Поэтому тушение пламенного горения происходит за доли секунды при попадании частиц порошка в реакционную зону. За это время температура в зоне химических реакций падает ниже $700 \text{ }^\circ\text{C}$. При этих значениях температуры резко снижается вероятность протекания цепных реакций горения и, следовательно, практически прекращается действие гетерогенного механизма тушения пожара. Дальнейшее снижение температуры горючего материала до температуры потухания ($\approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$) происходит в основном в результате поглощения тепла частицами порошка, сопровождающегося их испарением (гомогенным ингибированием), образованием изолирующей пленки расплава порошка либо конвективным теплообменом нагретых частиц порошка с окружающей средой. Можно заключить с высокой степенью достоверности, что основные характеристики тушения пожара (время тушения, удельный расход порошка) будут определяться эффек-

тивностью поглощения тепла частицами порошка, как процесса более медленного и теплоёмкого.

Характерной особенностью протекания теплового механизма тушения пожаров подкласса А1 при использовании для тушения модульных УПП является проявление инерционности передачи тепла частицам порошка вследствие ограниченности времени пребывания их в зоне конвективного теплообмена (тепловом слое).

Учёт инерционности особенно важен в случае тушения пожаров ТГМ модульными УПП импульсного и кратковременного действия. Как известно, время подачи огнетушащего порошка в зону горения меньше 1 с для модульных УПП импульсного типа и меньше 10 с в случае применения модульных УПП кратковременного воздействия. Скорости частиц порошка, истекающие из таких установок, могут составлять при достижении зоны горения десятки метров в секунду.

При попадании частиц огнетушащего порошка в очаг пожара часть из них оседает в обугленных зазорах горючего материала, а часть упруго отражается от ТГМ и выносится из зоны пожара. Отраженные частицы не успевают аккумулировать за время взаимодействия с горючим материалом максимальное количество теплоты вследствие конечности скорости переноса тепла. Чем больше скорость частиц огнетушащего порошка, т. е. чем больше интенсивность подачи порошка в зону горения, тем быстрее частицы порошка покидают зону горения, и тем меньшее количество поглощённого тепла уносят. Данная особенность приводит к необходимости увеличения расхода порошка для тушения пожара ТГМ при больших интенсивностях воздействия на очаг пожара, и, очевидно, является одной из причин наличия наблюдаемого в экспериментах оптимального значения интенсивности подачи порошка в зону горения, при котором на тушение пожара израсходуется минимальное количество огнетушащего порошка.

Считая, что основные параметры тушения пожаров подкласса А1 огнетушащим порошком определяются эффективностью протекания теплового механизма тушения, рассмотрим закономерности процесса тушения горючего материала охлаждением с учётом инерционности передачи тепла частицам порошка в способе тушения по площади.

Тепловой механизм тушения пожара порошком заключается в передаче тепла Q_{acc} , запасённого горючим материалом, частицам огнетушащего порошка. Это тепло тратится на нагрев

частиц порошка, их плавление и испарение. Математически условие тушения пожара запишется в виде:

$$Q_{acc} = Q_{abs} \quad (1)$$

где Q_{abs} – количество теплоты, поглощённой частицами порошка, Дж.

Будем считать очаг пожара потушенным, если температура его в результате поглощения тепла частицами порошка понизится до температуры пиролиза древесины T_{pyr} .

Выразим Q_{acc} через составляющие компоненты тепла очага пожара.

Будем рассматривать так называемый внешний пожар (пожар в открытом пространстве) [4]. Для него основными компонентами тепла являются:

– Q_{con} – количество теплоты, запасённое в слое ТГМ, прогревом до температуры, выше температуры выхода горючих газов;

– Q_{pyr} – количество тепла, запасённого горючим материалом в результате реакции пиролиза;

– Q_{rad} – количество тепла, аккумулированное горючим материалом в результате поглощения им отражённого в его сторону частицами огнетушащего порошка, движущимися к очагу пожара, части лучистого потока пламени очага пожара.

Для внутреннего пожара необходим также учёт тепла, передаваемого горючему материалу конвекцией и излучением от нагретых конструкций и оборудования помещения.

При сделанных уточнениях выражение (1) переписывается в виде:

$$Q_{acc} = Q_{con} + Q_{pyr} + Q_{rad} \quad (2)$$

Представим компоненты тепла в явном виде через физические величины, характеризующие процесс теплопередачи.

Среднее количество запасённого конвективного тепла Q_{acc} , исходя из линейного закона роста температуры, можно оценить по формуле:

$$Q_{acc} = \psi c_p \frac{(T_{sur} - T_{pyr})}{2} S_{sur} \tau_{acc} \quad (3)$$

где ψ – удельная массовая скорость выгорания материала, кг/(м²с); c_p – удельная теплоёмкость продуктов горения древесины ≈ 1470 Дж/(кгК); T_{sur} – температура поверхности горения $\approx (870-970)$ К (для древесины); T_{pyr} – температура пиролиза материала $\approx (470-570)$ К (для древесины); S_{sur} – площадь поверхности горения; τ_{acc} – время

аккумуляции тепла от момента достижения температуры T_{pyr} до начала тушения.

Учитывая данные из практики, что удельная экзотермическая теплота при пиролизе древесины составляет $\approx 6\%$ Q_{lhv} , где Q_{lhv} – низшая теплота сгорания древесины, можно оценить общее количество тепла Q_{pyr} из соотношения:

$$Q_{pyr} = 0,5\psi 0,06Q_{lhv}S_{sur}\tau_{acc}. \quad (4)$$

Исходя из закона Стефана-Больцмана,

$$Q_{rad} = k\varepsilon\sigma T^4 S_{sur}\tau_{exp}, \quad (5)$$

где k – приведённый коэффициент рассеяния лучистого потока слоем частиц порошка в направлении очага пожара; $\varepsilon \approx 0,85$ – степень черноты пожара; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Больцмана; T – температура факела пламени, К; τ_{exp} – время выпуска порошка из резервуара.

Определим количество теплоты Q_{abs} , поглощаемой частицами порошка.

Это тепло можно представить в виде суммы теплоты Q_{con} , переданной частицам порошка конвекцией и теплопроводностью в результате попадания на горящую поверхность, и теплоты Q_{labs} , аккумулированной частицами порошка на пути к очагу пожара при поглощении ими лучистого потока, излучаемого пламенем пожара.

Тепло Q_{con} в свою очередь можно представить в виде суммы теплоты Q_{rem} , переданной частицам порошка конвекцией и теплопроводностью при отражении их от горящего материала за пределы очага пожара, и теплоты Q_{set} , аккумулированной частью частиц порошка, осевших на горячей поверхности.

Вначале оценим величину тепла Q_{rem} , поглощённого частицами порошка за время взаимодействия τ_{in} их с горящим материалом и уносимого за пределы очага пожара в результате отражения частиц от данного материала.

Поскольку процесс взаимодействия частиц порошка с горящим материалом нестационарен вследствие конечности времени передачи тепла, запишем закон передачи тепла частицам порошка теплопроводностью и конвекцией в дифференциальной форме:

$$Q_{rem} = c_{pow}m_{rem}(T_{sur} - T_{par}) - \tau_{cons} \frac{\partial Q_{rem}}{\partial t}, \quad (6)$$

где c_{pow} – удельная теплоёмкость частиц порош-

ка, Дж/(кг·К); m_{rem} – масса частиц порошка, покидающих зону пожара, после упругого отражения от нагретого материала, кг; T_{par} – температура частиц порошка в момент взаимодействия с горящим материалом, К; τ_{const} – постоянная времени инерционности процесса (характерное время образования и рассасывания температурных неоднородностей вещества), с.

Величина τ_{const} связана с теплофизическими характеристиками вещества соотношением [9]:

$$\tau_{const} \sim \frac{c\rho l^2}{\lambda}, \quad (7)$$

где c – удельная теплоёмкость материала; ρ – плотность материала, кг/м³; l – характерный геометрический размер теплоактивной системы, м; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Интегрируя уравнение (6) в пределах времени от 0 до τ_{in} , получим, при условии, что в начале взаимодействия ($t = 0$) величина $Q_{rem} = 0$ и термическое сопротивление поверхности частиц порошка равно конвективному тепловому сопротивлению теплового слоя горящего материала, следующее выражение для Q_{rem} :

$$Q_{rem} = c_{pow}m_{rem}(T_{sur} - T_{par})(1 - \exp\left[-\frac{\tau_{in}}{\tau_{const}}\right]). \quad (8)$$

Величина $\tau_{in} \sim 2h/v$, где h – толщина теплового пограничного слоя, в котором происходит передача тепла частицам порошка; v – скорость частиц порошка в момент соприкосновения с нагретым горящим материалом.

Тепло Q_{set} , поглощаемое частицами порошка, осевшими на горящем материале, равно:

$$Q_{set} = c_{pow}m_{set}(T_{sur} - T_{par}), \quad (9)$$

где m_{set} – масса осевших частиц.

Тепло Q_{labs} в общем виде можно представить формулой:

$$Q_{labs} = \mu\varepsilon\sigma T^4 S_{sur}\tau_{exp}, \quad (10)$$

где μ – приведённый коэффициент поглощения слоя частиц порошка.

Общая масса частиц, вбрасываемых в зону горения, равна, $m_{set} + m_{rem}$.

С учетом формул (2), (5), (8)–(10) уравнение (1) теплового баланса тушения пожара запишется в виде:

$$Q_{pyr} + Q_{con} = \left[JA_{pow}(T_{sur} - T_{par})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{v\tau_{const}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\varepsilon\sigma T^4 S_{sur} \right] \tau_{exp}, \quad (11)$$

где $eJ = \frac{m_{set} + m_{rem}}{\tau_{exp} S_{sur}}$ – интенсивность подачи

порошка в зону горения; $\delta = \frac{m_{set}}{m_{set} + m_{rem}}$.

Определим время тушения пожара τ_{ext} , как величину, равную:

$$\tau_{ext} = \tau_{exp} + \tau_{cool}, \quad (12)$$

где τ_{cool} – характерное время остывания горюче-

го материала, равное промежутку времени от момента прекращения подачи порошка до времени, когда температура материала снижается до температуры начала его пиролиза. При охлаждении древесины водой оно равно ≈ 20 с [2]. В экспериментах по тушению древесины порошком «Вексон АВС-25» оно принималось равным ≈ 30 с.

С учётом (11) и (12) получим для оценки следующее уравнение:

$$\tau_{ext} = \frac{(Q_{pyr} + Q_{con})}{Jc_{pow}(T_{sur} - T_{pat})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{\nu\tau_{cont}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\epsilon\sigma T^4 S_{sur}} + \tau_{cool}. \quad (13)$$

Определим второй важный параметр тушения пожара – удельный расход огнетушащего по-

рошка G на тушение пожара. Для этого умножим выражение (13) на J . Имеем:

$$G = J\tau_{ext} = \frac{J(Q_{pyr} + Q_{con})}{Jc_{pow}(T_{sur} - T_{pat})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{\nu\tau_{cont}}\right])S_{sur} - (k - \mu)\epsilon\sigma T^4 S_{sur}}. \quad (14)$$

В выражении (14) слагаемое Jc_{pow} не учитывается, поскольку τ_{cool} – это время остывания горючего материала после прекращения подачи порошка в зону горения.

Соотношения (13) и (14) при стационарном теплообмене $\tau_{in} \gg \tau_{const}$ совпадают по структуре с выражениями для параметров τ_{ext} и G , приведёнными в работе [4], для данного режима тушения пожара ТГМ огнетушащим порошком общего назначения.

Анализ результатов теоретического описания теплового механизма тушения по площади пожара подкласса А1 огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на пожар

Проведём анализ полученных зависимостей времени тушения пожара и удельного расхода порошка на тушение пожара от его теплофизических характеристик, режимов подачи в зону горения и условий взаимодействия с горючим материалом.

Из структуры выражения (13) следует, что время тушения пожара при постоянных его тепловых характеристиках зависит от интенсивности подачи J огнетушащего порошка в зону горения и соотношения времен τ_{in} и τ_{const} , входящих в экспоненциальный множитель при J .

Рассмотрим влияние инерционности теплоактивной системы (частиц порошка) на перенос в ней тепла и соответственно на время тушения пожара.

При большой скорости переноса тепла в частицах порошка, т. е. когда $\tau_{const} \rightarrow 0$, экспоненциальный член в (13) также стремится к нулю. В отборе тепла эффективно участвуют все частицы порошка, взаимодействующие с нагретым горючим материалом, т. е. те, которые осели на горючем материале, и которые отразились от него. Реализуется стационарный режим тушения пожара. Структура выражений (13) и (14) совпадает в этом случае со структурой выражений для данных параметров, приведённых в работе [4]. С увеличением интенсивности подачи J огнетушащего порошка в зону горения знаменатель выражения (13) растёт, и время тушения стремится к минимальному значению.

В нестационарных условиях тушения пожара, когда величины τ_{in} и τ_{const} сопоставимы, параметры тушения пожара τ_{ext} и G будут определяться также соотношением значений τ_{in} и τ_{const} . Как видно из соотношения (7), время инерционности теплоактивной системы τ_{const} тем меньше, чем меньше её характерный размер, теплоёмкость и плотность тепловоспринимающего вещества, а также чем больше теплопроводность вещества.

Проведённые оценки величины τ_{const} для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ($c_{pow} = 1030$ Дж/кг·К; $\rho = 2020$ кг/м³; $\lambda = 4$ Вт/(м·К)) и моноаммонияфосфата ($c_{pow} = 1234$ Дж/кг·К; $\rho = 1803$ кг/м³; $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К)) показали, что для частиц с $l \approx 50$ мкм её значения равны соответственно

1,3 мс и 22 мс соответственно. Время взаимодействия частиц τ_{in} с горючим материалом при скорости в момент столкновения, равной ≈ 10 м/с и толщине теплового слоя ≈ 1 мм, составляет $\approx 0,2$ мс, т.е. почти на порядок меньше значения τ_{const} для частиц бикарбоната натрия и на два порядка меньше для частиц моноаммонияфосфата. В связи с этим экспоненциальный член в (12) для частиц моноаммонияфосфата практически равен 1 и в отборе тепла, сопровождающегося формированием плёнки расплава, участвуют только частицы, осевшие на горючем материале. Частицы, отразившиеся от горючего материала, будут покидать очаг пожара, не отобрав у него часть тепла. Отсюда следует, что в реальных условиях при конечности времени отклика частицы на воздействие тепла время тушения пожара будет больше, чем при мгновенной реакции частиц на него.

Увеличить эффективность отбора тепла частицами порошка, и тем самым, уменьшить время тушения пожара, можно несколькими способами: 1) уменьшить τ_{const} ; 2) увеличить τ_{in} ; 3) одновременно уменьшать τ_{const} и увеличивать τ_{in} .

Уменьшить τ_{const} , как следует из (7), можно, применяя для тушения пожара подкласса А1 огнетушащие порошки с высокой дисперсностью частиц, малыми теплоёмкостью и плотностью вещества, из которого они состоят, и большой его теплопроводностью.

Увеличить τ_{in} можно, понизив скорость частиц v , падающих на нагретый горючий материал. Эта скорость тем меньше, чем меньше скорость частиц v_0 на выходе модуля порошкового пожаротушения и чем меньше массовый расход порошка G [10].

Рассмотрим зависимость времени тушения пожара от интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара J .

Из (13) следует, что при уменьшении J время тушения пожара увеличивается. При значении J , равном:

$$J = \frac{k\varepsilon\sigma T^4}{c_{pow}(T_{sur} - T_{par})(1 - (1 - \delta)\exp\left[-\frac{2h}{v\tau_{const}}\right]) + \mu\varepsilon\sigma T^4}, \quad (15)$$

(равенство нулю знаменателя уравнения (13)) $\tau_{ext} \rightarrow \infty$. Другими словами, пожар, при такой интенсивности подачи порошка в зону пожара, потушить невозможно. Данная интенсивность подачи порошка в очаг пожара называется критической. В нашем случае это интенсивность, при которой частицами порошка, попавшими на горячую поверхность, поглощается только

часть тепла, равная по величине теплу лучистого потока, отражённого этими же частицами в сторону горящего материала ранее при движении к нему, и поглощённому им.

При увеличении интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара время тушения пожара, как видно из выражения (13), должно уменьшаться и, в итоге, стремиться к постоянному значению τ_{cool} . Однако, вследствие инерционности процесса поглощения тепла частицами порошка, динамика времени тушения пожара при росте J может отличаться от динамики, реализуемой при стационарном теплообмене. На зависимость времени тушения пожара от интенсивности будут влиять скоростные режимы подачи частиц порошка в зону горения.

Как видно из данных, приведённых в таблице, существует режим подачи порошка в очаг пожара, при котором средняя скорость частиц в зоне пожара принимает минимальное значение. При такой скорости частиц в отборе тепла участвует их максимальное число. Множитель при J в этом случае принимает максимальное значение. Следовательно, можно ожидать, что при интенсивности подачи порошка, при которой реализуется данная скорость частиц, должен наблюдаться минимум времени тушения пожара. Однако, как показали оценки величины знаменателя выражения (13), этого не происходит. Данное явление можно объяснить тем, что большая интенсивность подачи порошка, хотя и ухудшает условия отбора тепла частицами порошка, способствует увеличению интенсивности его отбора. Это очень важно, поскольку, как известно, для надёжного тушения пожара необходимо обеспечить превышение интенсивности отбора тепла от горючего материала над интенсивностью тепловыделения. Расчёт значений параметров, приведённых в таблице, проводился по формулам работы [10].

Проведём анализ зависимости от интенсивности подачи огнетушащего порошка в очаг пожара другой важной характеристики процесса тушения – удельного расхода порошка на тушение пожара. Как видно из структуры выражения (14), определяющего данный параметр, она сходна со структурой выражения (13) для оценки времени тушения пожара. Особенностью выражения (14) является то, что параметр J входит как в числитель, так и в знаменатель слагаемого этого выражения, выражающего соотношение тепла, накопленного ТГМ, к теплу, отбираемому частицами порошка от нагретого материала.

Таблица / Table

Результаты оценки параметров подачи огнетушащего порошка в зону горения

The results of the estimation of the parameters of the extinguishing powder in the combustion zone

Диаметр выходного отверстия модуля, мм Module outlet diameter, mm	Масса порошка, подаваемого в очаг, кг Weight of powder supplied in the combustion zone, kg	Средний массовый расход порошка, кг/с Average mass flow rate powder's, kg/s	Средняя скорость частиц на выходе модуля, м/с Average particle velocity at the output of the module, m/s	Средняя скорость частиц в зоне горения, м/с Average particle velocity in the combustion zone, m/s
13	0,87	1,34	17,47	8,64
16	0,66	1,367	11,68	7,24
24	0,6	1,74	6,62	6,12
24	0,8	2,09	7,94	6,76
24	1,0	2,406	9,14	7,38

Поэтому зависимость G от интенсивности подачи порошка в очаг пожара будет определяться, в основном, закономерностью изменения от данного параметра экспоненциального члена выражения (14). Он, как было отмечено выше, может принимать минимальное значение при определённой скорости частиц порошка, зависящей от J . Следовательно, зависимость $G(J)$ будет иметь экстремальное (минимальное) значение, т. е. на тушение пожара будет расходоваться минимальное количество порошка, приходящееся на единицу площади горящей поверхности. Интенсивность подачи порошка в очаг пожара, при которой реализуется данный минимум, называют оптимальной интенсивностью подачи.

Заключение

Получены экспериментальные зависимости времени тушения и удельного расхода огнетушащего порошка от интенсивности подачи порошка в зону горения при тушении модельного очага пожара подкласса А1 по площади и в ограниченном объёме. Анализ данных зависимостей показал наличие оптимального значения удельного расхода огнетушащего вещества для тушения пожара в зависимости от интенсивности подачи его в зону пожара.

Предложена модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 по площади огнетушащим порошком при кратковременном воздействии его на очаг пожара.

Модель учитывает инерционность передачи тепла частицам огнетушащего порошка от го-

рючего материала. Она позволяет оценить оптимальные условия подачи порошка в очаг пожара и подходящие параметры теплофизических характеристик частиц порошка, для эффективного тушения пожара подкласса А1 модульными установками порошкового пожаротушения импульсного и кратковременного действия.

Список использованных источников

1. Баратов, А.Н. Горение–Пожар–Взрыв–Безопасность / А.Н. Баратов. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
2. Адамян, В.Л. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / В.Л. Адамян – М.: Лань Спб, 2018. – 176 с.
3. Киреев, А.А. Исследование повторного воспламенения древесины, обработанной гелеобразующими огнетушащими составами / А.А. Киреев, С.Н. Бондаренко // Проблемы пожарной безопасности. – 2009. – Вып. 25. – С. 65–72.
4. Рашоян, И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара / И.И. Рашоян. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 107 с.
5. Кицак, А.И. Экспериментальная оценка эффективности тушения пожара подкласса А1 локально по площади и локально по объёму огнетушащим порошком общего назначения при его кратковременном воздействии на очаг пожара / С.М. Палубец, Д.В. Дробыш // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2019. – № 1 (45) – С. 29–41.
6. Корольченко, Д.А. Тушение пламени огнетушащим порошком и аэрозольными составами / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 8. – С. 63–68.

7. Корольченко, Д.А. Особенности тушения пламени высокодисперсными газоаэрозольными системами / Д.А. Корольченко, А.Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 10. – С. 66–72.

8. Корольченко, Д.А. Анализ процесса тушения пламени горючих жидкостей дисперсными огнетушителями веществами и пеной низкой кратности / Д.А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 2. – С. 52–56.

9. Якунин, М.М. Влияние процессов релаксации на перенос тепла, возникающего под действием интенсивных потоков энергии / М.М. Якунин // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 3. – С. 27–33.

10. Кицак, А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения / А.И. Кицак // Safety & Fire Technique – Т. 49, вып. 1. – Scientific and Research Centre for Fire Protection, Польша, 2018. – С. 76–85.

DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7

References

1. Baratov A.N. *Gorenie–Pozhar–Vzryv–Bezopasnost'* [Combustion–Fire–Explosion–Safety]. Moskva, FGU VNIPO MCHS ROSSII, 2003, 364 p.

2. Abduragimov I.M., Govorov V.Y., Makarov V.E. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physico-chemical basis for the development and extinguishing of fires]. Moskva, VIPSH MVD SSSR, 1980, 255 p.

3. Kireev A.A., Bondarenko S.N. [Investigation of reignition of wood treated with gelling extinguishing agents]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti* [The problem of fire safety], 2009, vol. 25, pp. 65–72 (in Russian).

4. Rashayan I.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozhara* [Physical and chemical bases of development and fire fighting]. Tolyatti, Tolyatti SU, 2013, 107 p.

5. Kitsak A.I. [Experimental evaluation of the fire extinguishing efficiency of fire of subclass A1 on the surface and in the bulk by general-purpose extinguishing powder with its short-term impact on the fire source]. *Chrezvychajnye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. [Emergency situations: prevention and liquidation], 2019, vol. 45, no. 1, pp. 29–41 (in Russian).

6. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A.F. [Extinguishing of a flame by dry chemical powder and aerosol compositions]. *Pozharovzryvbezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2014, no. 8, pp. 63–68 (in Russian).

7. Korol'chenko D.A., Sharovarnikov A. F. [Features of flame extinguishing by highly dispersed gas-aerosol systems]. *Pozharovzryvbezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2014, vol. 23, no. 10, pp. 66–72 (in Russian).

8. Korol'chenko D.A. [Analysis of the process of extinguishing a flame of flammable liquids by dispersed fire extinguishing agents and low expansion foam]. *Pozharovzryvbezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2016, vol. 25, no. 2, pp. 52–56 (in Russian).

9. Yakunin M.M. [The influence of relaxation processes on the transfer of heat generated by intense energy flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials processing], 2010, no. 3, pp. 27–33 (in Russian).

10. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into combustion zone. *BITP*, 2018, vol. 49, iss. 1, pp. 76–85.

DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.7

**Перечень статей, опубликованных в журнале
«ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ»
в 2019 г.**

Средства измерений

<i>Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Żukowski P.</i> Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures	1
<i>Gorbachenya K.N., Deineka R.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Shekhovtsov A.N., Kosmyna M.B., Kuleshov N.V.</i> Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 µm Laser Crystals	1
<i>Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Deineka R.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Mitina D.D., Volkova E.A., Leonyuk N.I.</i> Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal	4
<i>Rudnikov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai.</i> Compact 999.6 nm Actively Q-Switched Yb³⁺:LuAlO₃ Laser for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy	2
<i>Адамчук Д.В., Ксеневиц В.К.</i> Управление электрическими и оптическими параметрами активных элементов датчиков влажности на основе плёнок оксидов олова переменного состава	2
<i>Будников А.В., Шмелев Е.И., Куликов Д.А., Логинов А.В., Дмитриев С.М., Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Суворов А.С., Стуленков А.В.</i> Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчётов возбуждения конструкций потоком жидкости	3
<i>Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Булдакова И.В.</i> Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов	1
<i>Горбачук Н.И., Поклонский Н.А., Марочкина Я.Н., Шпаковский С.В.</i> Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого р–п–р-транзистора на его реактивный импеданс	4
<i>Джилавдари И.З., Мекид С., Ризноокая Н.Н.</i> Устройство и методика измерения моментов сил сопротивления качению на пятне контакта	4
<i>Довкша Д.В., Лешкевич С.В., Саечников В.А.</i> Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решётки для параболической зеркальной антенны космической связи	3
<i>Китиков В.О., Тернов Е.В., Даниленко А.В., Мухуров Н.И., Денисюк С.В.</i> Новые функциональные возможности пожарных извещателей для жилых и промышленных помещений	4
<i>Мартинюк А.О., Беляев Ю.В., Беляев Б.И., Чумаков А.В., Домарацкий А.В.</i> Маломассогабаритный бортовой модульный гиперспектрометр	1
<i>Новиченко А.В., Лукашевич Р.В., Сеньковский К.Г.</i> Создание полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования	2
<i>Скворцов Б.В., Самсонов А.С., Борминский С.А., Живоносная Д.М.</i> Устройство контроля качества токопроводящих покрытий элементов ракетно-космической техники	1
<i>Спиридонов А.А., Ушаков Д.В., Саечников В.А.</i> Моделирование работы навигационного приёмника для сверхмалого космического аппарата	4
<i>Янукович Т.П., Поляков А.В.</i> Моделирование распределённого измерителя силы тока на основе деформации оптического волокна	3

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V., Ventsuryk A.V., Vonsevych K.P.</i> Angular Photometry of Biological Tissue by Ellipsoidal Reflector Method	2
<i>Fiodortsev R.V., Silie Cuenca A.R., Kozhevnikov D.A., Medina V.M., Delgado R.</i> Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search	4
<i>Gula I.V., Polikarovskiykh O.I., Horiashchenko K.L., Karpova L.V., Melnychuk V.M.</i> Measurements of Periodic Signals Phase Shifts with Application of Direct Digital Synthesis	2
<i>Gutten M., Šebok M., Korenčiak D., Brnčal P., Kubiš M., Żukowski P., Koltunowicz T.N.</i> Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation	4
<i>Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Żukowski P.</i> Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method	3
<i>Алексеев В.А., Заринов М.Р., Перминов А.С., Ситникова Е.А., Усольцев В.П., Юран С.И.</i> Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки	2
<i>Антошин А.А., Никитин В.И.</i> Методика исследования динамики изменения параметров задымленной среды при переходе пиролиза в пламенное горение	4
<i>Баев А.Р., Левкович Н.В., Майоров А.Л., Асадчая М.В.</i> О рассеянии упругих волн неоднородной границей при акустическом контроле неразъёмных соединений	4
<i>Баев А.Р., Майоров А.Л., Левкович Н.В., Асадчая М.В.</i> Особенности распространения поверхностных и подповерхностных волн в объектах со слоистой структурой. Ч. 2. Упрочнённый неоднородный поверхностный слой	1
<i>Бусько В.Н., Осипов А.А.</i> Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов	3
<i>Горбачук Н.И., Поклонский Н.А., Марочкина Я.Н., Шпаковский С.В.</i> Контроль дифференциального сопротивления p - n -переходов биполярного транзистора в активном режиме методом импедансной спектроскопии	3
<i>Дмитриев С.М., Рязанов Р.Р., Мамаев А.В., Соборнов А.Е., Котин А.В., Легчанов М.А., Львов А.В.</i> Измерение температурного и напряжённо-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций	1
<i>Кицак А.И.</i> Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена	4
<i>Поклонский Н.А., Сягло А.И., Вырко С.А., Раткевич С.В., Власов А.Т.</i> Модель автоэлектронной эмиссии из торца плоского графена в вакуум	1
<i>Пономарева О.В., Пономарев А.В., Смирнова Н.В.</i> Цифровизация измерений спектров в базисе Фурье – тенденции развития и проблем	3
<i>Сандомирский С.Г.</i> Зависимость коэффициента корреляции между результатами измерения параметра и его истинными значениями от приведённой погрешности измерения	1
<i>Тимофеев А.М.</i> Методика повышения достоверности принятых данных счётчика фотонов на основе анализа скорости счёта импульсов при передаче двоичных символов «0»	1
<i>Фираго В.А., Кубарко А.И.</i> Методика определения диаметра и площади внутреннего просвета видимых сосудов глаза	2
<i>Ходасевич М.А., Скорбанова Е.А., Роговая М.В.</i> Применение многопараметрического анализа широкополосных спектров пропускания для калибровки физико-химических показателей вин	2

Методы измерений, контроля, диагностики

Шейников А.А., Исаев А.В., Зеленко В.В., Суходолов Ю.В. Спектральный метод измерения изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов 2

Щербаков С.С. Измерение и анализ в реальном времени локальных повреждений при износоусталостных испытаниях 2

Методы оценки качества объектов и процессов

Серенков П.С., Романчук В.М. Качество как субъективно измеряемая величина 1

The List of the Articles Published in the Journal "DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS" in 2019

Measuring Instruments

- Adamchuck D.V., Ksenevich V.K.* **Control of Electrical and Optical Parameters of Humidity Sensors Active Elements Based on Tin Oxides Films with Variable Composition** 2
- Bondarenko G.G., Fisher M.R., Kristya V.I., Żukowski P.* **Modeling of an Impact of Thin Insulating Film on the Electrode Surface on Discharge Ignition in Mercury Illuminating Lamps at Low Ambient Temperatures** 1
- Budnikov A.V., Shmelev E.I., Kulikov D.A., Loginov A.V., Dmitriev S.M., Pribaturin N.A., Lobanov P.D., Suvorov A.S., Stulenkov A.V.* **Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation by Fluid Flow** 3
- Douksha D.V., Liashkevich S.V., Saetchnikov V.A.* **Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna** 3
- Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N.* **Device and Method of Measuring of the Moments of Rolling Resistance Forces on the Contact Spot** 4
- Gorbachenya K.N., Deineka R.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Shekhovtsov A.N., Kosmyna M.B., Kuleshov N.V.* **Er,Yb:Ca₃RE₂(BO₃)₄ (RE=Y, Gd) – Novel 1.5 μm Laser Crystals** 1
- Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Deineka R.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Mitina D.D., Volkova E.A., Leonyuk N.I.* **Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal** 4
- Gorbachuk N.I., Poklonski N.A., Marochkina Ya.N., Shpakovski S.V.* **Effect of Hole Extraction from the Base Region of a Silicon p–n–p Transistor on its Reactive Impedance** 4
- Kitikov V.O., Ternov E.V., Danilenko A.V., Mukhurov N.I., Denisyuk S.V.* **New Functional Possibilities of Fire Detectors for Residential and Industrial Rooms** 4
- Martinov A.O., Beliaev Yu.V., Beliaev B.I., Chumakov A.V., Damaratski A.V.* **The Small-Scale Satellite Modular Hyperspectrometer** 1
- Novichenko A.V., Lukashevich R.V., Senkovsky K.G.* **Low Dose Rate X-Ray Radiation Fields Implementation for Study of Energy Response of the Dosimeters Based on Scintillation Detectors** 2
- Rudnikov Alexander, Kisel Viktor, Yasukevich Anatol, Hovhannesyanyan Karine, Petrosyan Ashot, Kuleshov Nikolai.* **Compact 999.6 nm Actively Q-Switched Yb³⁺:LuAlO₃ Laser for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy** 2
- Skvortsov B.V., Samsonov A.S., Borminskiy S.A., Zhivonosnovskaya D.M.* **Device for Conductive Coatings Quality Control of Rocket and Space Technique Elements** 1
- Spiridonov A.A., Ushakov D.V., Saetchnikov V.A.* **Simulation of Navigation Receiver for Ultra-Small Satellite** 4
- Volkova L.V., Muraveva O.V., Muravev V.V., Buldakova I.V.* **Device and Methods for Measuring of Acoustic Anisotropy and the Residual Stress in the Main Gas Pipelines' Metal** 1
- Yanukovich T.P., Polyakov A.V.* **Simulation of Distributed Current Sensor Based on Optical Fiber Deformation** 3

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

- Alekseev V.A., Zaripov M.R., Perminov A.S., Sitnikova E.A., Usol'tsev V.P., Yuran S.I.* **Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line** 2
- Antoshyn A.A., Nikitin V.I.* **Technique for Studying of the Dynamics of Changes of a Smoky Environment Parameters during the Transition of Pyrolysis to Flame Combustion** 4

Baev A.R., Levkovich N.V., Mayorov A.L., Asadchaya M.V. Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary in the Acoustic Testing of Permanent Joints	4
Baev A.R., Mayorov A.L., Levkovich N.V., Asadchaya M.V. Features of the Surface and Subsurface Waves Application for Ultrasonic Evaluation of Physicomechanical Properties of Solids. Part 2. Strengthened Inhomogeneous Surface Layer	1
Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V., Ventsuryk A.V., Vorsevych K.P. Angular Photometry of Biological Tissue by Ellipsoidal Reflector Method	2
Busko V.N., Osipov A.A. Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials	3
Dmitriev S.M., Ryazapov R.R., Mamaev A.V., Sobornov A.E., Kotin A.V., Legchanov M.A., Lvov A.V. Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample under the Local Stochastic Temperature Pulsations	1
Fiodortsev R.V., Silie Cuenca A.R., Kozhevnikov D.A., Medina V.M., Delgado R. Application of Satellite Image Processing Methods for Hydrocarbon Field Search	4
Firago V.A., Kubarko A.I. Technique for Measuring of Internal Diameter and Area of Visible Vessels in the Eye	2
Gorbachuk N.I., Poklonski N.A., Marochkina Ya.N., Shpakovski S.V. Controlling of Differential Resistance of $p-n$-Junctions of Bipolar $p-n-p$-Transistor in Active Mode by Method of Impedance Spectroscopy	3
Gula I.V., Polikarovskiykh O.I., Horiashchenko K.L., Karpova L.V., Melnychuk V.M. Measurements of Periodic Signals Phase Shifts with Application of Direct Digital Synthesis	2
Gutten M., Šebok M., Korenčiak D., Brnčal P., Kubiš M., Żukowski P., Koltunowicz T.N. Frequency Domain Diagnostics of Transformer Insulation	4
Khodasevich M.A., Scorbanov E.A., Rogovaya M.V. Application of Multivariate Analysis of Broadband Transmission Spectra for Calibration of Physico-Chemical Parameters of Wines	2
Kitsak A.I. Model of Thermal Mechanism of Subclass A1 Fire Extinguishing with General Purpose Fire Extinguishing Powder in Non-Stationary Heat Exchange Conditions	4
Poklonski N.A., Siahlo A.I., Vyrko S.A., Ratkevich S.V., Vlassov A.T. Model of Field Electron Emission from the Edge of Flat Graphene into Vacuum	1
Ponomareva O.V., Ponomarev A.V., Smirnova N.V. Digitalization of Spectral Measurements in the Fourier Basis – Development Trends and Problems	3
Sandomirski S.G. Dependence of the Correlation Coefficient Between the Results of a Parameter Measurement and Its True Values on the Reduced Measurement Error	1
Sheinikov A.A., Isaev A.V., Zelenko V.V., Sukhodolov Yu.V. Spectral Method of Measuring of Changes in Time Intervals between Periodic Pulse Sequences	2
Sherbakov S.S. Measurement and Real Time Analysis of Local Damage in Wear-and-Fatigue Tests	2
Skazochkin A.V., Bondarenko G.G., Żukowski P. Research of Surface Wear Resistance of Aluminum Alloy Modified with Minerals using Sclerometry Method	3
Timofeev A.M. Methods of Increasing the Reliability of the Received Data of the Photon Counter Based on the Analysis of the Pulse Counting Rate During the Transmission of Binary Symbols «0»	1

Methods of Quality Estimation of Products and Processes

Serenkov P.S., Romanchak V.M. Quality as Subjectively Measured Value	1
---	---

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адамчук Д.В.	2	Карпова Л.В.	2
Алексеев В.А.	2	Кисель В.Э.	1, 2, 4
Антошин А.А.	4	Китиков В.О.	4
Асадчая М.В.	1, 4	Кицак А.И.	4
Баев А.Р.	1, 4	Кожевников Д.А.	4
Беляев Б.И.	1	Колтунович Т.Н.	4
Беляев Ю.В.	1	Коренчак Д.	4
Безуглая Н.В.	2	Космына М.Б.	1
Безуглый М.А.	2	Котин А.В.	1
Бондаренко Г.Г.	1, 3	Кристя В.И.	1
Борминский С.А.	1	Ксенович В.К.	2
Брнчал П.	4	Кубарко А.И.	2
Будников А.В.	3	Кубиш М.	4
Булдакова И.В.	1	Кулешов Н.В.	1, 2, 4
Бусько В.Н.	3	Куликов Д.А.	3
Венцурик А.В.	2	Левкович Н.В.	1, 4
Власов А.Т.	1	Легчанов М.А.	1
Волкова Е.А.	4	Леонюк Н.И.	4
Волкова Л.В.	1	Лешкевич С.В.	3
Вонсевич К.П.	2	Лобанов П.Д.	3
Вырко С.А.	1	Логинов А.В.	3
Горбаченя К.Н.	1, 4	Лукашевич Р.В.	2
Горбачук Н.И.	3, 4	Львов А.В.	1
Горященко К.Л.	2	Майоров А.Л.	1, 4
Гула И.В.	2	Мальцев В.В.	4
Гуттен М.	4	Мамаев А.В.	1
Даниленко А.В.	4	Марочкина Я.Н.	3, 4
Дейнека Р.В.	1, 4	Мартинов А.О.	1
Делгадо Р.	4	Медина В.М.	4
Денисюк С.В.	4	Мекид С.	4
Джилавдари И.З.	4	Мельничук В.М.	2
Дмитриев С.М.	1, 3	Митина Д.Д.	4
Довкша Д.В.	3	Муравьев В.В.	1
Домарацкий А.В.	1	Муравьева О.В.	1
Живоносная Д.М.	1	Мухуров Н.И.	4
Жуковский П.	1, 3, 4	Никитин В.И.	4
Зарипов М.Р.	2	Новиченко А.В.	2
Зеленко В.В.	2	Ованесьян К.	2
Исаев А.В.	2	Осипов А.А.	3
		Перминов А.С.	2
		Петросян А.	2
		Поклонский Н.А.	1, 3, 4

Поликарровских О.И.	2	Суворов А.С.	3
Поляков А.В.	3		
Пономарев А.В.	3	Тернов Е.В.	4
Пономарева О.В.	3	Тимофеев А.М.	1
Прибатурин Н.А.	3		
		Усольцев В.П.	2
Раткевич С.В.	1	Ушаков Д.В.	4
Ризноокая Н.Н.	4		
Роговая М.В.	2	Фёдорцев Р.В.	4
Романчак В.М.	1	Фираго В.А.	2
Руденков А.	2	Фишер М.Р.	1
Рязапов Р.Р.	1		
		Ходасевич М.А.	2
Саечников В.А.	3, 4		
Самсонов А.С.	1	Чумаков А.В.	1
Сандомирский С.Г.	1		
Сеньковский К.Г.	2	Шебок М.	4
Серенков П.С.	1	Шейников А.А.	2
Силие Куэнсо А.Р.	4	Шеховцов А.Н.	1
Ситникова Е.А.	2	Шмелев Е.И.	3
Сказочкин А.В.	3	Шпаковский С.В.	3, 4
Скворцов Б.В.	1		
Скорбанова Е.А.	2	Щербаков С.С.	2
Смирнова Н.В.	3		
Соборнов А.Е.	1	Юран С.И.	2
Спиридонов А.А.	4		
Стуленков А.В.	3	Янукович Т.П.	3

AUTHOR INDEX

Adamchuck D.V.	2	Kisel V.E.	1, 2, 4
Alekseev V.A.	2	Kitikov V.O.	4
Antoshyn A.A.	4	Kitsak A.I.	4
Asadchaya M.V.	1, 4	Korenčiak D.	4
		Koltunowicz T.N.	4
Baev A.R.	1, 4	Kosmyna M.B.	1
Beliaev B.I.	1	Kotin A.V.	1
Beliaev Yu.V.	1	Kozhevnikov D.A.	4
Bezuglaya N.V.	2	Kristya V.I.	1
Bezuglyi M.A.	2	Ksenevich V.K.	2
Bondarenko G.G.	1, 3	Kubarko A.I.	2
Borminskiy S.A.	1	Kubiš M.	4
Brnčal P.	4	Kuleshov N.V.	1, 2, 4
Budnikov A.V.	3	Kulikov D.A.	3
Buldakova I.V.	1		
Busko V.N.	3	Legchanov M.A.	1
		Leonyuk N.I.	4
Chumakov A.V.	1	Levkovich N.V.	1, 4
		Liashkevich S.V.	3
Damaratski A.V.	1	Lobanov P.D.	3
Danilenko A.V.	4	Loginov A.V.	3
Deineka R.V.	1, 4	Lukashevich R.V.	2
Delgado R.	4	Lvov A.V.	1
Denisyuk S.V.	4		
Dmitriev S.M.	1, 3	Maltsev V.V.	4
Douksha D.V.	3	Mamaev A.V.	1
		Marochkina Ya.N.	3, 4
Fiodortsev R.V.	4	Martinov A.O.	1
Firago V.A.	2	Mayorov A.L.	1, 4
Fisher M.R.	1	Medina V.M.	4
		Mekid S.	4
Gilavdary I.	4	Melnychuk V.M.	2
Gorbachenya K.N.	1, 4	Mitina D.D.	4
Gorbachuk N.I.	3, 4	Mukhurov N.I.	4
Gula I.V.	2	Muravev V.V.	1
Gutten M.	4	Muraveva O.V.	1
		Novichenko A.V.	2
Horiashchenko K.L.	2	Nikitin V.I.	4
Hovhannesyan K.	2		
		Osipov A.A.	3
Isaev A.V.	2		
		Perminov A.S.	2
Karpova L.V.	2	Petrosyan A.	2
Khodasevich M.A.	2	Poklonski N.A.	1, 3, 4

Polikarovskiykh O.I.	2	Smirnova N.V.	3
Polyakov A.V.	3	Sobornov A.E.	1
Ponomarev A.V.	3	Spiridonov A.A.	4
Ponomareva O.V.	3	Stulenkov A.V.	3
Pribaturin N.A.	3	Sukhodolov Yu.V.	2
		Suvorov A.S.	3
Ratkevich S.V.	1	Šebok M.	4
Riznookaya N.	4		
Rogovaya M.V.	2	Ternov E.V.	4
Romanchak V.M.	1	Timofeev A.M.	1
Rudenkov A.	2		
Ryazapov R.R.	1	Ushakov D.V.	4
		Usol'tsev V.P.	2
Saetchnikov V.A.	3, 4	Ventsuryk A.V.	2
Samsonov A.S.	1	Vlassov A.T.	1
Sandomirski S.G.	1	Volkova E.A.	4
Scorbanov E.A.	2	Volkova L.V.	1
Senkovsky K.G.	2	Vonsevych K.P.	2
Serenkov P.S.	1	Vyrko S.A.	1
Sheinikov A.A.	2		
Shekhovtsov A.N.	1	Yanukovich T.P.	3
Sherbakov S.S.	2	Yasukevich A.S.	1, 2, 4
Shmelev E.I.	3	Yuran S.I.	2
Shpakovski S.V.	3, 4		
Siahlo A.I.	1	Zaripov M.R.	2
Silie Cuenca A.R.	4	Zelenko V.V.	2
Sitnikova E.A.	2	Zhivonosnovskaya D.M.	1
Skazochkin A.V.	3	Žukowski P.	1, 3, 4
Skvortsov B.V.	1		

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

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и четким. Фотографии представляются в электронном виде (**формат tif, jpg, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расширяются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), символы химических элементов (в т.ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы:
74835; 748352