

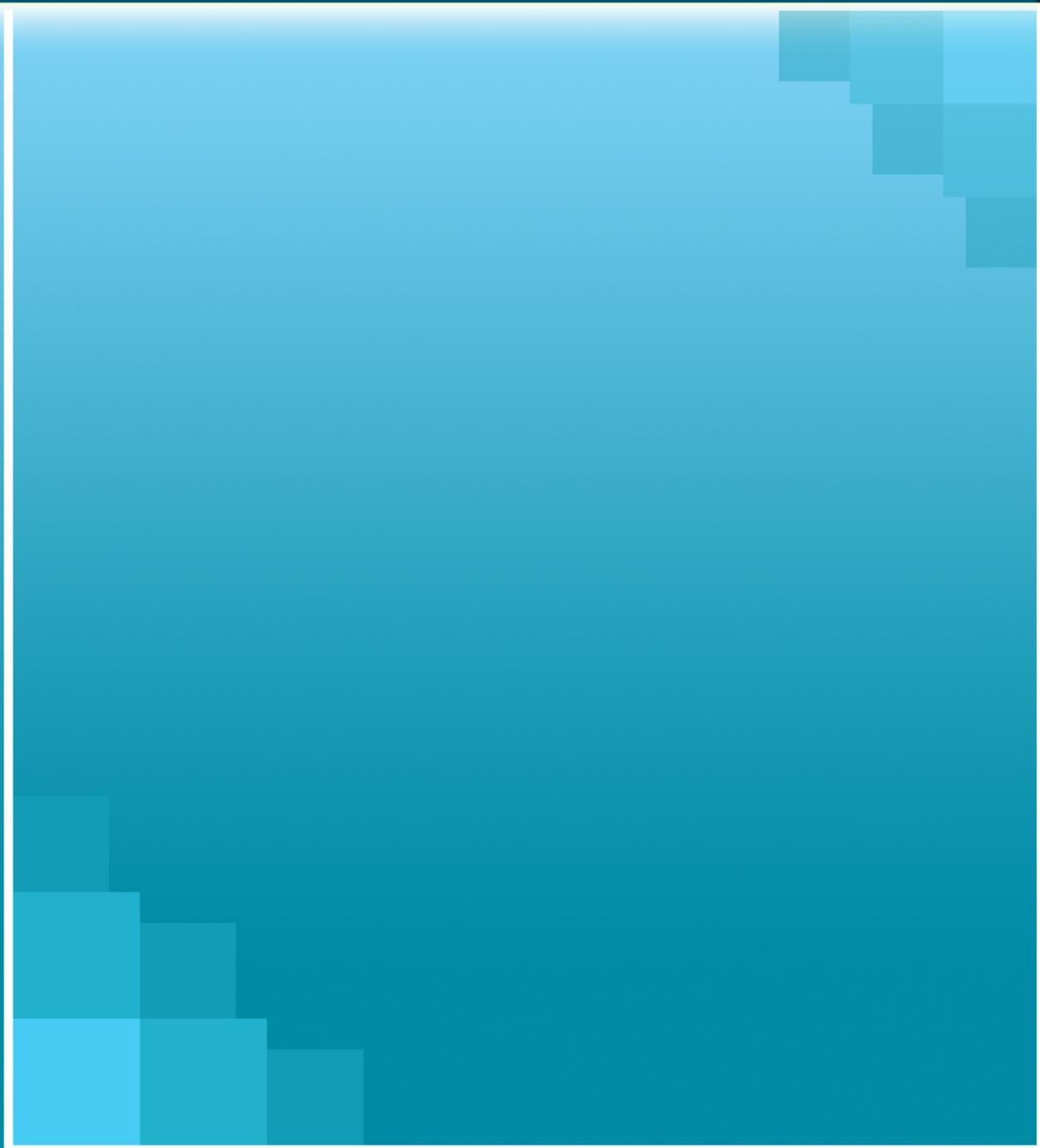
ISSN 2220-9506

№ 1 (10), 2015

Приборы и Методы Измерений

1 (10) 2015

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ



Научно-технический журнал
**ПРИБОРЫ И
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
О. К. Гусев

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
А. М. Маляревич
СЕКРЕТАРЬ
Р. И. Воробей

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

И. З. Джилавдари, А. П. Достанко,
А. Л. Жарин, М. Г. Киселёв,
Ф. Ф. Комаров, Н. В. Кулешов,
П. В. Кучинский, В. А. Малкин,
В. А. Пилипенко, Ю. М. Плескачевский,
П. С. Серенков, В. Л. Соломахо,
А. С. Турцевич, В. В. Хатько,
А. П. Шкадаревич, К. В. Юмашев

МЕЖДУНАРОДНЫЙ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. А. Алексеев (*Россия*),
В. М. Анищик (*Беларусь*),
А. И. Белоус (*Беларусь*),
А. Бубулис (*Литва*),
А. А. Вайн (*Эстония*),
Я. Виба (*Латвия*),
А. П. Гринчук (*Беларусь*),
М. Гуттен (*Словакия*),
С. Дэнилак (*США*),
Н. А. Жагора (*Беларусь*),
П. Жуковский (*Польша*),
Ю. В. Загашвили (*Россия*),
И. П. Захаров (*Украина*),
Т. Н. Колтунович (*Польша*),
А. Кэмп (*Великобритания*),
Н. А. Кухаренко (*Беларусь*),
В. В. Машко (*Беларусь*),
В. В. Муравьёв (*Беларусь*),
Це Ли (*Китай*),
А. Ф. Чернявский (*Беларусь*),
С. А. Чижик (*Беларусь*)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

*Белорусский национальный
технический университет
пр. Независимости, 65,
корп. 17, комн. 432,
220013, г. Минск, Беларусь
тел.: (017) 293 96 67
факс: (017) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by*

Сайт: <http://pimi@bntu.by>

Scientific and Engineering Journal
**DEVICES AND
METHODS OF MEASUREMENTS**

EDITOR-IN-CHIEF
O. K. Gusev

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF
A. M. Maliarevich
SECRETARY
R. I. Varabei

EDITORIAL BOARD

I. Z. Gilavdary, A. P. Dostanko,
A. L. Zharin, M. G. Kiselev,
F. F. Komarov, N. V. Kuleshov,
P. V. Kuchynski, V. A. Malkin,
V. A. Pilipenko, Yu. M. Pleskachevsky,
P. S. Serenkov, V. L. Solomakho,
A. S. Turtsevich, V. V. Khatko,
A. P. Shkadarevich, K. V. Yumashev

INTERNATIONAL

ADVISORY EDITORIAL BOARD

V. A. Alekseev (*Russia*),
V. M. Anishchik (*Belarus*),
A. I. Belous (*Belarus*),
A. Bubulis (*Lithuania*),
A. A. Vain (*Estonia*),
Ja. Viba (*Latvia*),
A. P. Grinchuk (*Belarus*),
M. Gutten (*Slovakia*),
S. Danyluk (*USA*),
N. A. Zhagora (*Belarus*),
P. Zukowski (*Poland*),
Yu. V. Zagashvili (*Russia*),
I. P. Zakharov (*Ukraine*),
T. N. Koltunowicz (*Poland*)
A. Kemp (*UK*),
N. A. Kuharenko (*Belarus*),
V. V. Mashko (*Belarus*),
V. V. Murav'iov (*Belarus*),
Tse Li (*China*),
A. F. Cherniavsky (*Belarus*),
S. A. Chizhik (*Belarus*)

EDITORIAL OFFICE

*Belarusian National
Technical University
Nezavisimosty Ave., 65,
Building 17, Room 432,
220013, Minsk, Belarus
Tel.: +375 (17) 293 96 67
Fax: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by*

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 2 раза в год

Минск, БНТУ, 2015 г., № 1(10)

Содержание

Средства измерений

<i>Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л., Кулешов В.К.</i> Приемник субмиллиметрового диапазона длин волн на искусственных материалах.....	5
<i>Никоненко С.В., Луценко Е.В., Данильчик А.В., Длугунович В.А., Ждановский В.А., Крейдич А.В., Липлянин А.А., Ржеуцкий М.В.</i> Комплекс для измерений фотометрических, радиометрических, спектрометрических и пространственных характеристик излучения лазерных диодов и светодиодов в спектральном диапазоне от 250 до 900 нм.....	10
<i>Savitski V.G.</i> Pulsed KGd(WO ₄) ₂ Raman laser: towards emission linewidth narrowing.....	18
<i>Беляев Б.И., Голубев Ю.В., Гусев В.Ф., Пасенюк А.А., Сосенко В.А.</i> Бортовая система автоматической ориентации видеоспектральной аппаратуры для Международной космической станции	26
<i>Длугунович В.А., Исаевич А.В., Круплевич Е.А., Насенник Л.Н.</i> Влияние характеристик излучения лазеров на точность калибровки средств измерений.....	31
<i>Шилько С.В., Кузьминский Ю.Г., Борисенко М.В.</i> Аппаратная реализация и апробация неинвазивной диагностики гемодинамики на основе тензометрии и расширенной тонометрии.....	39

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Подмастерьев К.В., Подмастерьев А.К.</i> Электрорезистивный метод контроля процесса приработки подшипников качения.....	47
--	----

<i>Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л.</i> Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона.....	56
<i>Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И.</i> Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов.....	64
<i>Ермакович О.Л., Лисовский Г.А., Кучинский П.В., Титовицкий И.А.</i> Повышение точности измерений радиоизотопного плотномера.....	70
<i>Кузнецов П.Л., Муравьев В.В.</i> Контроль качества электролитических танталовых конденсаторов с использованием СТРЕСС-ТЕСТА.....	76
<i>Анищик В.М., Кулешов А.К., Углов В.В., Русальский Д.П., Сыщенко А.Ф.</i> Определение адгезионной прочности Mo-Ti-N и Mo-Cu-N покрытий на установке «скретч-тестер».....	81
<i>Черненко А.С., Контуш С.М., Зинченко А.С., Калинин В.В., Калугин В.В.</i> Определение гранулометрического состава порошков пылеугольного топлива автоматизированной системой.....	87
<i>Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Филипня В.А., Шведов С.В., Черный В.В., Явид В.Ю., Янковский Ю.Н.</i> Анализ качества подзатворного диэлектрика МОП-структур по вольт-фарадным характеристикам.....	94
<i>Кадолич Ж.В., Зотов С.В., Гольдаде В.А., Цветкова Е.А., Овчинников К.В., Ухарцева И.Ю.</i> Экспериментальное обоснование выбора идентификационного признака пальмовых масел.....	99
<i>Муравьев О.А., Хоминич А.Л.</i> Современные подходы при измерении параметров приемопередающих модулей широкополосных радиосистем.....	105
<i>Сотский Н.Б.</i> Измерение параметров позы и биомеханический компьютерный синтез двигательного действия человека.....	114

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.

Макет и верстка : Дубаневич А.В., редактор : Иванова Т.А.

Подписано в печать 15.05.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 300 экз.

Дата выхода в свет .2015. Заказ № .

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

SCIENTIFIC AND ENGINEERING JOURNAL

Published since 2010

Founder

Belarusian National Technical University

Issued twice per year

Minsk, BNTU, 2015, № 1(10)

Contents

Measuring instruments

<i>Esman A.K., Potachits V.A., Zykov G.L., Kuleshov V.K.</i> Detector for submillimeter wavelength range on the basis of the man-made materials	5
<i>Nikanenka S.V., Lutsenko E.V., Danilchuk A.V., Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Kreidzich A.V., Liplianin A.A., Rzhetski M.V.</i> Setup for measurement of the photometric, radiometric, spectral and spatial characteristics of radiation of laser diodes and leds in the spectral range from 250 to 900 nm	10
<i>Savitski V.G.</i> Pulsed KGd(WO₄)₂ Raman laser: towards emission linewidth narrowing	18
<i>Belyaev B.I., Golubev Yu.V., Gusev V.F., Paseniuk A. A., Sosenko V.A.</i> International space station onboard orientation system for videospectral equipment	26
<i>Dlugunovich V.A., Isaevich A.V., Kruplevich E.A., Nasennik L.N.</i> Effect of lasers characteristics on the accuracy of laser meters calibration	31
<i>Shil'ko S.V., Kuzminsky Yu.G., Borisenko M.V.</i> Apparatus realization and approval of non-invasive diagnostics of hemodynamics based on tensometry and extended tonometry	39

Methods of measurements, monitoring, diagnostics

<i>Podmasteryev K.V., Podmasteryev A.K.</i> Electro-resistance method of check a process grinding the rolling bearings	47
---	----

<i>Panteleyev K.V., Svistun A.I., Zharin A.L.</i> Methods for local changes in the plastic deformation diagnostics on the work function	56
<i>Ahmed M.L. Al-Mzirawi, Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I.</i> Estimation of thermal imager minimum resolvable temperature difference	64
<i>Ermakovich O.L., Lisovsky G.A., Kuchinski P.V., Titovitsky I.A.</i> Increasing of accuracy for density measurement making by a radioisotopic basis weight sensor	70
<i>Kuznetsov P.L., Muraviev V.V.</i> The quality control of electrolytic tantalum capacitors by using the STRESS TEST	76
<i>Anischik V.M., Kuleshov A.K., Uglov V.V., Rusalsky D.P., Syschenko A.F.</i> Measurement of adhesion strength of Mo-Ti-N and Mo-Cu-N coatings using «scratch-tester» device	81
<i>Chernenko A.S., Kontush S.M., Zinchenko A.S., Kalinchak V.V., Kalugin V.V.</i> Determination of granulometric composition of pulverized coal by automated system	87
<i>Odzhaev V.B., Pyatlitski A.N., Prosolovich V.S., Filipenya V.A., Shvedau S.V., Chernyi V.V., Yavid V.Yu., Yankouski Yu.N.</i> Quality analysis of the gate dielectric of the MOS-structures by capacity-voltage characteristics	94
<i>Kadolich Zh.V., Zotov S.V., Goldade V.A., Tsvetkova E.A., Ovchinnikov K.V., Ukhartseva I.Yu.</i> Experimental justification of identity feature choice of palm oils	99
<i>Murauyou A.A., Khaminich A.L.</i> Modern measurement approaches of broadband wireless transceiver modules parameters	105
<i>Sotsky N.B.</i> Posture measurement and biomechanical computer synthesis of human motions	114

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 535.231.62:535.14

ПРИЕМНИК СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л., Кулешов В.К.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: ak_esman@bntu.by

Разработан неохлаждаемый высокоэффективный болометрический приемник на основе массива планарных резонансных элементов микро- и наноразмеров, расположенных по траектории двухзаходной спирали в строго геометрическом порядке. Показано, что предложенный приемник субмиллиметрового диапазона позволяет достичь потерь на отражение -26,4 дБ, коэффициента стоячей волны 1,1 и коэффициента полезного действия ~ 98 %.

Ключевые слова: приемник субмиллиметрового диапазона длин волн, массив планарных резонансных элементов, потери на отражение, коэффициент стоячей волны, коэффициент полезного действия.

Введение

В последнее время активно развиваются пути совершенствования параметров и характеристик приемников электромагнитного излучения, находящегося между оптическим и СВЧ диапазонами, на основе неохлаждаемых детекторов, интегрированных в планарные антенны. Технологий производства терагерцовых чувствительных элементов достаточно много, но практически наиболее востребованными являются микроболометры и ферроэлектрики (тонкопленочные и толстопленочные) [1].

В настоящее время микроболометры имеют преимущество перед ферроэлектриками, что подтверждается ориентацией производителей на использование микроболометров [2, 3]. Микроболометры производятся двух типов: охлаждаемые и неохлаждаемые, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, но, по критерию «цена – эффективность» лидирующие позиции занимают неохлаждаемые микроболометры, которые будут рассмотрены в данной работе. Принцип работы таких детекторов основан на

регистрации изменений электрических свойств чувствительного элемента в зависимости от количества попадающей на его поверхность тепловой энергии соответствующего электромагнитного диапазона длин волн [4].

В последние годы широкое применение находят искусственные материалы, так называемые метаматериалы, обладающие уникальными свойствами, которые отсутствуют в природных материалах [5]. Такие среды позволяют управлять свойствами электромагнитных волн и тем самым открывают широкие возможности по созданию оригинальных преобразователей с улучшенными параметрами и характеристиками [6].

Цель работы – исследование и оптимизация микроболометра, интегрированного в планарную двухзаходную спиральную антенну, выполненную на основе массивов периодически расположенных резонаторов микро- и наноэлементов, в форме спиральных фрагментов, размеры которых существенно меньше длины волны принимаемого электромагнитного излучения.

Структура микроболометра

Предложенный микроболометр конструктивно представляет собой приемную часть, выполненную на основе массива планарных резонансных элементов 2 и 7, расположенных по траектории двухзаходной спирали в строго геометрическом порядке (рисунок 1). Термочувствительный элемент 5 содержит микрорезонансные элементы на кремниевой подложке 1 в виде фрагментов левых и правых спиралей 2 и 7. Вдоль всех сторон термочувствительного элемента располагаются спирали микрометровых размеров.

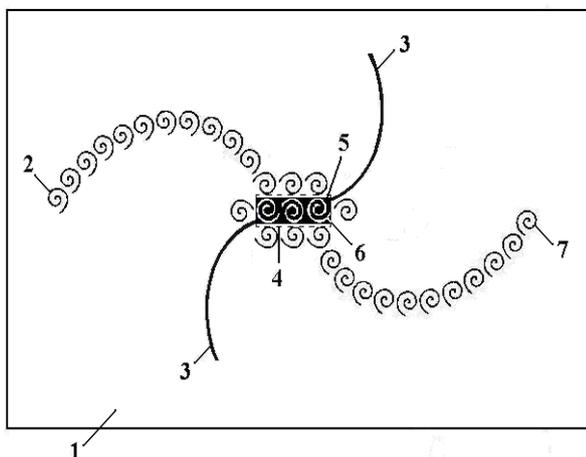


Рисунок 1 – Неохлаждаемый приемник терагерцового излучения: 1 – подложка; 2 – массив левых спиральных фрагментов; 3 – выводы; 4 – поглотитель; 5 – термочувствительный элемент; 6 – микрорезонаторы; 7 – массив правых спиральных фрагментов

Микроболометр располагается на кремниевой подложке 1 с относительной диэлектрической проницаемостью 11,9. Длина и радиус резонансных спиральных элементов из хрома равны 1,8 витка и 0,8 мкм соответственно. Термочувствительный элемент 5 с размерами 3,4 мкм × 10,9 мкм × 50 нм и выводы 3 с длиной, шириной и толщиной соответственно 93 мкм, 1,2 мкм и 1 мкм также выполнены из хрома с удельной проводимостью $\sim 1,3 \times 10^{-7}$ Ом·м. Термочувствительный элемент 5 содержит щели в виде трех фрагментов спиралей.

В рассматриваемом приемнике входное электромагнитное излучение поступает на массив левых 2 и правых 7 спиральных фрагментов и микрорезонаторы 6, эффективно поглощаются ими, т.е. практически без отражения, так как

изменение показателя преломления на границе раздела незначительно. При этом входное излучение, прошедшее через термочувствительный элемент 5, возвращается обратно после отражения от тыльной стороны подложки 1 для повторного поглощения. Поглощенное электромагнитное излучение наводит в микрорезонаторах 6 спиральной формы электрические токи, которые нагревают термочувствительный элемент 5. Так как удельное сопротивление термочувствительного элемента 5 зависит от температуры, то электрический информационный сигнал с выхода устройства формируется стандартным образом путем измерения сопротивления между выводами 3.

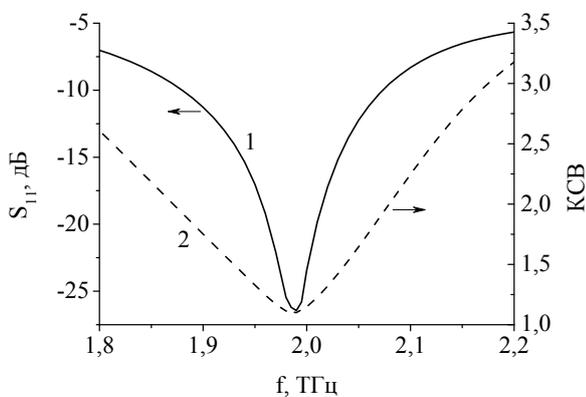
Компьютерное моделирование

Моделирование электродинамических основных ожидаемых параметров и характеристик болометрического приемника проводилось с помощью стандартизированного в промышленности программного пакета *Ansoft HFSS* [7]. Моделирование в *HFSS* основано на использовании метода конечных элементов, включающего адаптивное генерирование и деление ячеек, и является достаточно эффективным при исследовании всех необходимых параметров и характеристик микроболометра. В тех местах, где происходят значительные изменения амплитуды электромагнитного поля, осуществляется дополнительное разбиение элементов. Это разбиение в ряде случаев позволяет уменьшить число итераций для выполнения критерия сходимости, а также уменьшить конечное число элементов – тетраэдров в сетке разбиения, что, как следствие, приводит к экономии времени моделирования или позволяет разработчику получить более мелкое локальное разбиение модели, а это, в свою очередь, определяет точность результатов. В то же время аппаратные ресурсы компьютера, на котором выполняется компьютерный эксперимент, определяют время расчета основных параметров и характеристик предложенного приемника.

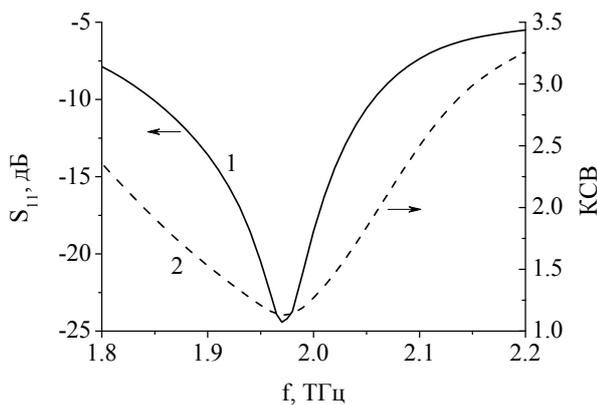
Анализ полученных результатов

Частотные зависимости потерь излучения за счет отражения (S_{11}) и коэффициента стоячей волны (КСВ) микроболометрического приемника для двух значений ширины b резонансных спиральных элементов приведены на рисунке 2.

Экстремальные значения $S_{11} = -26,45$ дБ и $KCB = 1,11$ достигаются на частоте 1,99 ТГц при $b = 475$ нм, а $S_{11} = -24,42$ дБ и $KCB = 1,13$ достигаются на частоте 1,97 ТГц при $b = 400$ нм. Увеличение ширины b от 200 до 475 нм и одновременное уменьшение расстояния h между ними и термочувствительным элементом от 300 до 25 нм приводит к увеличению мощности, поглощаемой термочувствительным элементом, от $7,98 \times 10^7$ до $4,37 \times 10^9$ Вт/м² (вставка на рисунке 3). Частотные зависимости напряженности E и мощности P термочувствительного элемента при ширине $b = 475$ нм и расстоянии $h = 25$ нм приведены на рисунке 3. Показано, что их максимальные значения $2,12 \times 10^6$ В/м и $4,37 \times 10^9$ Вт/м² соответственно достигаются на частоте 1,9 ТГц.



а



б

Рисунок 2 – Частотные зависимости потерь на отражение электромагнитного излучения S_{11} (1) и коэффициента стоячей волны (2) болометрического приемника с шириной резонансных спиральных элементов, равной 475 (а) и 400 (б) нм

Из рисунка 3 следует, что значения ширины резонансных спиральных элементов

$b = 475$ нм и расстояния между ними и термочувствительным элементом $h = 25$ нм являются оптимальными.

На частотах, при которых достигаются экстремальные значения S_{11} и KCB , для двух различных значений ширины b рассчитаны угломестные диаграммы направленности исследуемого приемника (рисунок 4). Коэффициент направленного действия (КНД) достигает значения 5,84 на частоте 1,99 ТГц при азимутальном угле $\varphi = 237^\circ$, угле места $\theta = 180^\circ$ и ширине $b = 475$ нм.

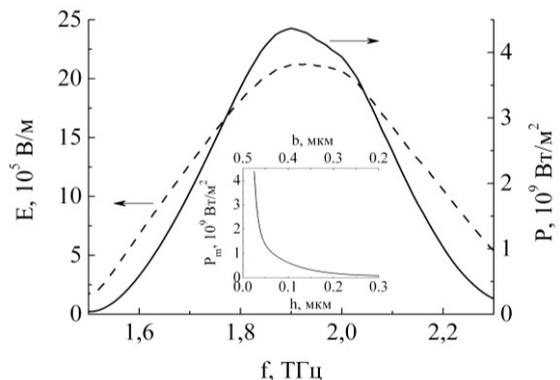


Рисунок 3 – Частотная зависимость напряженности E (сплошная линия) и мощности, поглощаемой термочувствительным элементом, P (штриховая линия). На вставке – зависимость максимальных значений мощности, поглощаемой термочувствительным элементом, P_m от ширины резонансных элементов b и расстояния h между ними и термочувствительным элементом

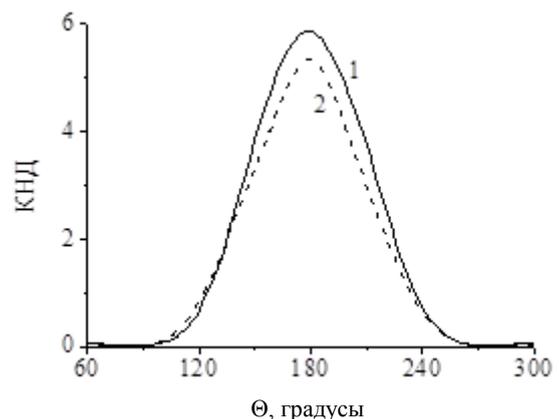


Рисунок 4 – Угломестные диаграммы направленности приемника субмиллиметрового излучения для азимутального угла $\varphi = 237^\circ$ и частот $f = 1,99$ (1) и $1,97$ (2) ТГц при ширине спиральных элементов 475 (1) и 400 (2) нм

Расчетная зависимость коэффициента полезного действия приемника субмиллиметрового излучения от толщины используемой кремние-

вой подложки d_n , при оптимальных значениях ширины резонансных спиральных элементов и расстояния между ними и термочувствительным элементом, приведена на рисунке 5. Из полученного результата следует, что оптимальное значение толщины подложки d_n составляет 45 мкм, при которой КПД достигает ~ 98 %.

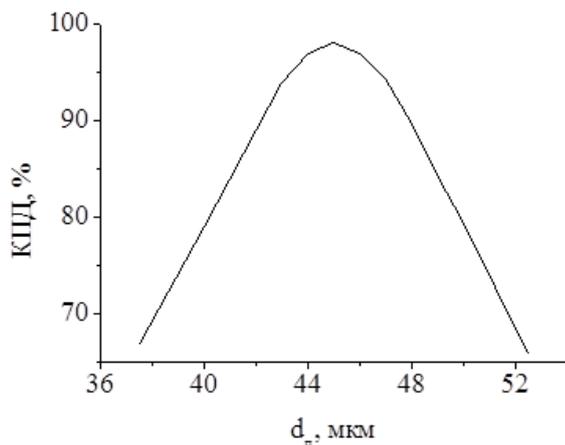


Рисунок 5 – Зависимость КПД приемника субмиллиметрового излучения от толщины подложки d_n

Заключение

Показано, что разработанный неохлаждаемый болометрический приемник на основе массивов периодически расположенных резонаторов микронных и нанометровых размеров, представляющих собой искусственно структурированные материалы, элементы которых существенно меньше длины волны принимаемого электромагнитного излучения, позволяет достичь потерь на отражение $-26,4$ дБ, коэффициента стоячей волны 1,1 и коэффициента полезного действия ~ 98 %.

Список использованных источников

1. Корнеева, М.Д. Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотэлектроники (Часть 1) / М.Д. Корнеева, В.П. Пономаренко, А.М. Филачев // Прикладная физика. 2011. – № 2. – С. 47–60.
2. Cherepenin, V.A. Hot-electron superconducting nanobolometers-sensors and arrays of them for high sensitive terahertz frequency range imaging radiometers / V.A. Cherepenin [et al.] // Journal of radio electronics. – 2011. – № 3. – P. 12–16.
3. Karasik, B.S. Nanobolometers for THz photon detection / B.S. Karasik, A.V. Sergeev, D.E. Prober // IEEE Transactions on Terahertz Science. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 97–111.
4. Приемник терагерцового излучения: патент 15640 Респ. Беларусь, МПК G 01 J 5/02 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л.Зыков; заявитель ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси». № а 20100740; заявл. 15.05.2010, опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 140–141.
5. Гуляев, Ю.В. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения / Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 5. – С. 438–457.
6. Болометрический детектор инфракрасного излучения: патент 18656 Респ. Беларусь, МПК G 01J 5/20 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков, В.Б. Залесский; заявитель ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси». № а 20120708; заявл. 07.05.2012, опубл. 30.10.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 5. – С. 98.
7. Банков, С.Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С.Е. Банков, Э.М. Гутцайт, А.А. Курушин. – М. : Оркада, 2012. – 250 с.

DETECTOR FOR SUBMILLIMETER WAVELENGTH RANGE ON THE BASIS OF THE MAN-MADE MATERIALS

Esman A.K., Potachits V.A., Zykov G.L., Kuleshov V.K.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus
e-mail: ak_esman@bntu.by

Abstract. The uncooled high-performance bolometric detector based on an array of planar resonant elements, located on the double-threaded spiral trajectory in a strictly geometrical order, with micro- and na-

noscales is developed. It is shown that the proposed detector for submillimeter wavelength range can reach the reflection losses of $-26,4$ dB, the standing wave ratio of 1,1 and conversion efficiency of ~ 98 %.

Keywords: detector for submillimeter wavelength range, array of planar resonant elements, reflection losses, standing wave ratio, conversion efficiency.

References

1. Korneeva M.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M. [The current status and new directions of the semiconductor infrared photonics (Part 1)]. *Prikladnaya fizika*, 2011, no. 2, pp. 47–60 (in Russian).
2. Cherepenin V.A. et al. Hot-electron superconducting nanobolometers-sensors and arrays of them for high sensitive terahertz frequency range imaging radiometers. *Journal of radio electronics*, 2011, no. 3, pp. 12–16.
3. Karasik B.S., Sergeev A.V., Prober D.E. Nanobolometers for THz photon detection. *IEEE Transactions on Terahertz Science*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 97–111.
4. Esman A.K., Kuleshov V.K., Zykov G.L. *Priyomnik teragercovogo izlucheniya* [The receiver of terahertz radiation]. Patent RB no. 15640, 2012.
5. Gulyaev Yu.V., Lagarkov A.N., Nikitov S.A. [Metamaterials: basic research and application prospects]. *Byulleten' Rossijskoj akademii nauk*, 2008, vol. 78, no. 5, pp. 438–457.
6. Esman A.K., Kuleshov V.K., Zykov G.L., Zalessky V.B. *Bolmetricheskij detector infrakrasnogo izlucheniya* [Bolometer infrared detector]. Patent RB no. 18656, 2014.
7. Bankov S.E., Gutzait E.M., Kurushin A.A. *Reshenie opticheskikh i SVCH zadach s pomoschyu HFSS* [Solution of the optical and microwave problems using HFSS]. Moscow: Orkada Publ., 2012. 250 p.

Поступила в редакцию 08.12.2014.

УДК 535.24

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ,
РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ, СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИХ
И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ И СВЕТОДИОДОВ В СПЕКТРАЛЬНОМ
ДИАПАЗОНЕ ОТ 250 ДО 900 НМ**

*Никоненко С.В., Луценко Е.В., Данильчик А.В., Длугунович В.А., Ждановский В.А.,
Крейдич А.В., Липлянин А.А., Ржеуцкий М.В.*

Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Представлена информация о принципе действия созданного комплекса для измерений фотометрических, радиометрических, спектрометрических и пространственных характеристик твердотельных источников излучения в спектральной области от 250 до 900 нм и результатах его метрологической аттестации. Предложены новые подходы в измерении усредненного значения яркости и спектральной плотности энергетической яркости излучения светодиодов и лазерных диодов, пространственного распределения силы света и плотности мощности излучения лазерных диодов, силы света и энергетической силы излучения светодиодов и лазерных диодов.

Ключевые слова: светодиоды, лазерные диоды, ультрафиолетовое излучение.

Введение

В Республике Беларусь широко используются различные источники ультрафиолетового излучения (УФИ). Особенно развито использование УФИ в медицине и косметологии и в связанных с ними биологических и медицинских научных исследованиях. В последнее время бурно развиваются новые области применения источников излучения ультрафиолетовой (УФ) области спектра, что обусловлено появлением компактных долговечных УФ светодиодов (СИД). Например, УФ отверждение полимеров (нефтехимическая промышленность, полиграфия, мебельное производство и др.), экспресс идентификация химических веществ и биологических объектов (отравляющих и взрывчатых веществ, наркотиков и т.д.). Особое место в новых применениях УФИ занимают светодиодные технологии дезинфекции воды, алкогольной продукции и продуктов питания для их долговременного хранения, что особо актуально для предприятий Республики Беларусь. Можно утверждать, что в ближайшие годы традиционные источники УФИ во многих приложениях будут заменены на СИД и лазерные диоды (ЛД).

Негативное воздействие УФ излучения на человека и на все живое носит сложный характер и сильно зависит от его спектральных и энергетических характеристик. Соответственно, требуется объективная информация о спектрометрических характеристиках источников УФИ, полученная с необходимой точностью. Однако эти виды измерений являются достаточно трудоемкими и дорогими. Поэтому широко распространен подход, характеризующий мощность УФИ в определенных спектральных интервалах 400–315 нм (диапазон А), 315–285 нм (диапазон В) и 285–200 нм – (диапазон С). Но в этом случае необходимы фотоприемники, имеющие как стабильную во времени чувствительность, так и стабильные к УФ воздействию светофильтры, отсекающие излучение из других областей спектра, что является достаточно большой проблемой. Также на точность результатов измерений оптических характеристик излучения оказывает влияние отличие спектральных распределений мощности излучения испытываемого и эталонного источников излучения. Значимой проблемой также является и изменение (деградация) первоначальных параметров излучения всех типов источников УФИ. Например, уменьшение интенсивности

излучения бактерицидных ламп, что существенно снижает обеззараживающий эффект, и др. [1].

Введение сертификации продукции в Республике Беларусь и проведение ее по правилам и процедурам согласно международными стандартами *ISO* серии 9000 предусматривает контроль качества продукции с помощью средств измерений, откалиброванных стандартизованными методами на национальной эталонной базе. Изделия, созданные на базе УФ твердотельных источников излучения (ТТИИ), производимые, закупаемые и используемые в Республике Беларусь, в абсолютном большинстве случаев не имеют документально оформленного метрологическими органами подтверждения их технических и метрологических характеристик. Это обусловлено в первую очередь отсутствием необходимой эталонной метрологической базы и аккредитованных калибровочных и испытательных лабораторий. Поэтому производитель или потребитель изделий, изготовленных на основе УФ ТТИИ, не может достоверно установить соответствие их характеристик и параметров, заявленных поставщиком. Кроме того, производители СИД заявляют характеристики, полученные при импульсном возбуждении, когда перегрев активной области УФ СИД мал, и поэтому заявленные характеристики имеют существенное отличие от характеристик УФ СИД в реальных режимах эксплуатации. Вместе с тем использование СИД и лазерной техники, особенно работающей в УФ диапазоне, не имеющей подтверждения оптических характеристик метрологическими органами, может как привести к отрицательным последствиям, отражающимся на качестве работ, проводимых с такой техникой, так и представлять угрозу человеческому здоровью.

Отметим также, что до недавнего времени в Беларуси отсутствовала возможность измерений в аккредитованных испытательных и калибровочных лабораториях пространственного распределения силы света, плотности мощности и спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения СИД и ЛД, а также создаваемой ими в УФ диапазоне спектра спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) [2].

Измерения оптических характеристик твердотельных источников излучения

Спектральное и пространственное распределения мощности излучения СИД, ЛД и традиционных источников УФИ существенно от-

личаются, поэтому традиционные методы измерений оптических характеристик их излучения приемлемы не в полной мере [3]. Кроме того, хотя СИД и ЛД относятся к ТТИИ, существующие методы измерений оптических характеристик и параметров их излучения имеют между собой существенные отличия.

В настоящее время для измерений характеристик лазерного излучения (ЛИ) действует система стандартов *ISO*, которые в целом достаточно обоснованы, но особенности излучения полупроводниковых лазеров, имеющих большую расходимость, в них не учитываются. Например, в стандартах [4–8] методы измерений пространственных характеристик ЛИ применимы только для излучения с углом расходимости менее 30 мрад, в то время как углы расходимости излучения полупроводниковых лазеров составляют от 1° до 90°. Для СИД основным документом в международной метрологической практике, в котором определены фотометрические, радиометрические, спектрорадиометрические и колориметрические величины, характеризующие их излучение и методы их измерений, являются рекомендации Международной комиссии по освещению *CIE-127* [9]. Согласно [9] измерения оптических характеристик излучения СИД необходимо выполнять на относительно небольших расстояниях, хотя в этих условиях они не являются точечными источниками излучения. К тому же как первичные, так и вторичные оптические компоненты СИД оказывают существенное влияние на пространственное и спектральное перераспределение излучения, соответственно универсальной геометрии измерений, применимой к большому числу типов СИД, не существует и их корректное сравнение является проблемой. Попытка *CIE* разрешить проблему измерений большого числа типов СИД в отсутствии универсальной геометрии измерений состоит в введении новой характеристики излучения СИД – усредненной силы света (усредненной энергетической силы излучения), которая определяется как сила света в стандартных условиях *CIE A* и *B*. Оба условия включают использование приемника с круговой апертурной диафрагмой площадью 100 мм² (диаметр 11,3 мм). Расстояние от СИД до апертурной диафрагмы фотометра (радиометра) для условия *A* составляет 316 мм, для условия *B* – 100 мм, что соответствует телесному углу 0,001 ср для условия *A*, и 0,01 ср для условия *B*. Соответствующие плоские углы равны 2° и 6,5°.

Измерения фотометрических и радиометрических величин в общем случае согласно [9] можно проводить методами, реализующими как детекторный (передача размеров единиц величин осуществляется с помощью эталонов сравнения – детекторов), так и излучательный (с помощью эталонных источников излучения) подходы. При излучательном подходе СИД, используемые в качестве эталонных, должны иметь пространственное и спектральное распределения излучения, подобные испытываемому СИД. Кроме того, у эталонного СИД пространственное распределение силы света в пределах $\pm 10^\circ$ от оси должно быть гладким и примерно постоянным. Если спектральные условия не соблюдаются, то рекомендуется проводить коррекцию результатов измерений на спектральное рассогласование СИД. Для испытания различных типов СИД нужно иметь такое же количество типов эталонных СИД, что является крайне затратным подходом.

Поэтому нами был реализован детекторный подход для измерений фотометрических характеристик излучения СИД. Согласно [9] в этом случае следует применять калиброванный фотометр с индексом спектрального рассогласования не хуже 3 %. Тогда усредненную силу света светодиода для стандартного условия CIE A (или B), в канделах, можно определить по формуле:

$$I_{LED(A/B)} = E_{A(B)} \cdot L_{A(B)}^2, \quad (1)$$

где $l_{A(B)}$ – расстояние, соответствующее стандартным условиям CIE A или B, м; $E_{A(B)}$ – освещенность, измеренная фотометром при стандартных условиях CIE A или B, лк. Измерения силы света рекомендовано выполнять в направлении механической оси СИД [9]. Однако механическая ось, как правило, не совпадает с оптической осью излучения СИД, что обусловлено пространственной неточностью посадки светодиодного кристалла и дефектами первичной оптики СИД. Поэтому значения силы света, а также энергетической силы излучения логично измерять по направлению оптической оси СИД, после определения пространственного распределения интенсивности излучения.

Нами были проведены экспериментальные исследования пространственного распределения силы света различных СИД в двух взаимоперпендикулярных плоскостях, результаты ко-

торых представлены на рисунке 1, при этом механической оси соответствует данные при угле 0° , а шаг по углу составлял $0,5^\circ$. Из рисунка видно, что пространственное распределение силы света имеет неоднородный характер в двух взаимоперпендикулярных плоскостях для всех типов СИД, а в узком угловом диапазоне, определяемом стандартными условиями CIE A или B, сила света СИД слабо зависит от угла только для СИД, представленных на рисунках 1а, б, в.

Но даже в этих случаях стандартные условия CIE A и B не в полной мере характеризуют излучение с пространственным распределением, характерным для современных СИД, применяемых в светотехнических устройствах. Введение стандартных условий CIE A и B, по видимому, было обусловлено тем, что в 1997 г. [9], когда они были впервые приняты, абсолютное большинство СИД представляло из себя 3, 5 и 10 мм пластиковые светодиоды с узкой индикатрисой силы излучения. Поэтому для объективной характеристики необходимо проводить измерение пространственного распределения силы света и энергетической силы излучения СИД и ЛД.

Для измерений *пространственного распределения силы света* I_{LEDv} нами применялся гониофотометрический метод. Расстояние между фотометром и СИД в этом случае должно быть как можно большим [9], чтобы СИД можно было считать точечным источником. Данный метод также позволял при использовании калиброванного радиометра измерять и *пространственное распределение плотности мощности излучения* ЛД и СИД. Плотность мощности ЛД E_σ в этом случае рассчитывают по формуле:

$$E_\sigma = \frac{\bar{P}}{\sigma}, \quad (2)$$

где \bar{P} – среднее значение мощности излучения, Вт; σ – площадь диафрагмы, m^2 . Данный метод также использовался для измерения *пространственного распределения плотности мощности излучения* ЛД, что является вполне оправданной процедурой, так как, несмотря на отсутствие рекомендаций в стандартах ISO, данные измерения де-факто применяются производителями ЛД и служат одной из важнейших характеристик для расчета вторичной оптики лазерных излучателей.

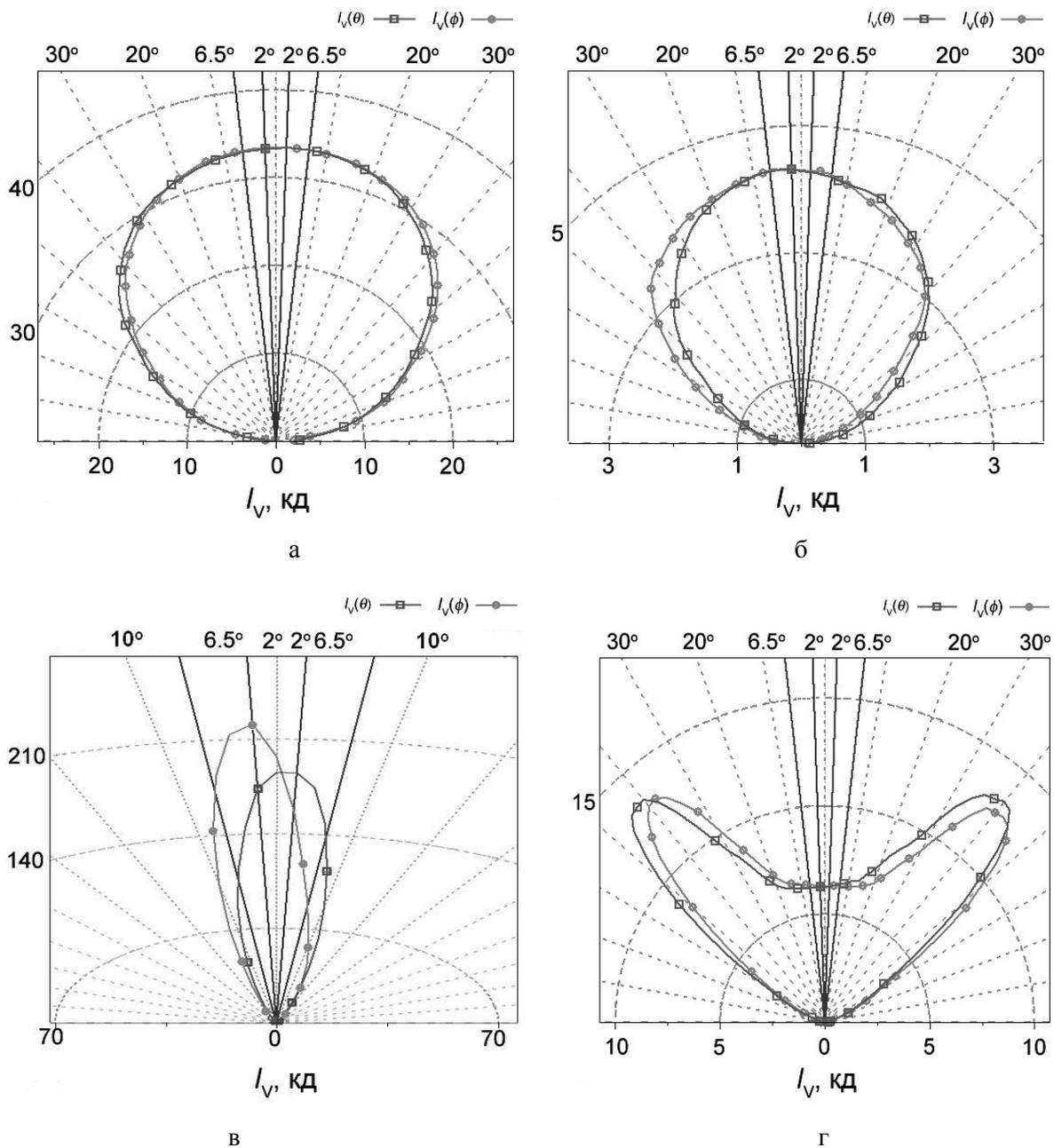


Рисунок 1 – Пространственное распределение силы света светодиодов I_V в двух взаимоперпендикулярных плоскостях: а – *LXML-PWN2*; б – *LXML-PM01*; в – *P2KW*; г – *LuxeonStar*. Символами \square и \circ обозначены линии соответствующие двум взаимоперпендикулярным плоскостям и не являются экспериментальными данными

Для измерений *спектральной плотности энергетической освещенности* (СПЭО), создаваемой излучением СИД, согласно рекомендациям [9], нами применялся метод замещения, используя эталонные лампы, калиброванные по СПЭО и спектрорадиометр. В этом случае СПЭО ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$) при длине волны λ рассчитывается по формуле:

$$E_{e\lambda LED} = E_{e\lambda S} \frac{Y_{e\lambda LED}}{Y_{e\lambda S}}, \quad (3)$$

где $E_{e\lambda S}$ – СПЭО эталонной лампы; $Y_{e\lambda LED}$ – измеренный сигнал при освещении испытуемым СИД; $Y_{e\lambda S}$ – измеренный сигнал при освещении эталонной лампы.

Для измерений *спектральной плотности энергетической яркости* (СПЭЯ) излучения СИД в [9] рекомендации ограничены только краткой фразой о необходимости «применять фотометр с изображающей оптикой», что весьма неудобно с точки зрения технической реализации. Так как размеры кристалла УФ СИД обычно не превышают 1 мм, то для формирования изображения необходимо использование УФ оптики с большим увеличением, не дающей при этом значительных спектральных и пространственных искажений. Поэтому мы применили нетрадиционный подход: так как ряд СИД изделий можно классифицировать как равнояркий источник излучения, то *усредненное значение* СПЭЯ излучения испытуемого светодиода $L_{\text{эксLED}}$ ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{ср}^{-1}$) при длине волны λ , можно определить по формуле:

$$L_{\text{эксLED}} = \frac{E_{\text{эксLED}} \cdot l^2}{A_s}, \quad (4)$$

где $E_{\text{эксLED}}$ – измеренное значение СПЭО, создаваемой светодиодом на расстоянии l между механическим центром апертурной диафрагмы, установленной перед светодиодом, и входной апертурной диафрагмой интегрирующей сферы; A_s – площадь светящейся области СИД или выходной апертурной диафрагмы, установленной перед светодиодом. Таким же образом возможно измерение усредненного значения СПЭЯ излучения ЛД (по известному распределению в ближнем поле излучения), а также усредненного значения яркости излучения СИД и ЛД.

Комплекс для измерений оптических характеристик твердотельных источников излучения в диапазоне от 250 до 900 нм

В 2010–2013 гг. в Институте физики НАН Беларуси был разработан и создан комплекс для измерений оптических характеристик ТТИИ в диапазоне от 250 до 900 нм. Схема комплекса приведена на рисунке 2. Комплекс предназначен для измерений с учетом рекомендаций [9] следующих характеристик излучения СИД и СИД изделий: силы света, усредненной силы света, пространственного распределения силы света и СПЭЯ, а также создаваемых этим излучением освещенности и СПЭО. Комплекс также обеспечивает измерения следующих характеристик ЛИ в соответствии с требованиями

[8]: средней мощности, плотности мощности и пространственного распределения плотности мощности.

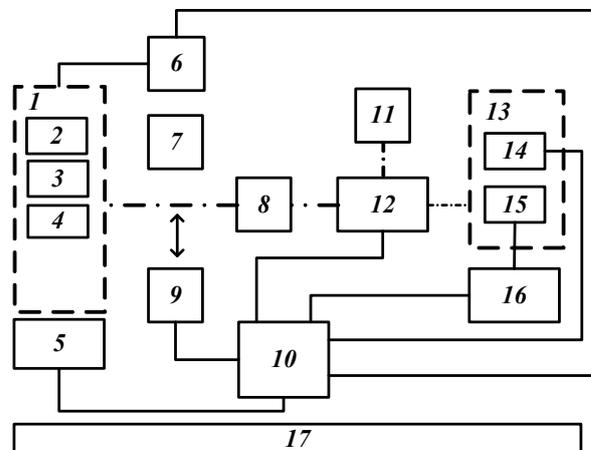


Рисунок 2 – Схема комплекса для измерений оптических характеристик твердотельных источников излучения: 1 – блок источников излучения; 2 – субблок лазерных источников излучения; 3 – субблок светодиодов источников излучения; 4 – субблок ламповых источников излучения; 5 – гониометрическая система; 6 – блок питания и контроля источников излучения; 7 – система юстировки; 8 – блок входной оптики; 9 – фотометр (радиометр); 10 – компьютер; 11 – блок экспресс анализа; 12 – монохроматор; 13 – блок приемников излучения; 14 – трап-детектор (фотодиод); 15 – ФЭУ со счетчиком фотонов; 16 – система регистрации; 17 – оптический стол

Комплекс функционирует в 6 режимах: измерения силы света и усредненной силы света излучения СИД; измерения средней мощности и плотности мощности ЛИ; измерения пространственного распределения силы света излучения СИД и пространственного распределения плотности мощности излучения СИД и ЛД; измерения СПЭО, создаваемой ЛД и СИД; измерения СПЭЯ излучения СИД. Следует отметить, что комплекс позволяет проводить испытания также и других источников излучения, например, ламп.

Фотометрическая часть комплекса основана на фотометре *LMT 520B*, радиометрическая – на головке *OPHIR PD300-UV-SH*. Для измерений фотометрических и радиометрических величин используется система юстировки 7 [10]. При измерениях устанавливаются параметры питания и температуры источников излучения (блок 6, содержит высокоточные стабилизированные источники питания, термоконтроллеры и мультиметры), что позволяет моделировать условия, приближенные к реальным условиям эксплуата-

ции светотехнических изделий. Все компоненты комплекса могут работать как независимо, так и под управлением компьютера 10. Сигналы приемников излучения регистрируются системой регистрации 16. Программное обеспечение комплекса обеспечивает представление результатов как в цифровом, так и графическом виде.

Спектрорадиометрическая часть комплекса состоит из блока входной оптики 8, блока экспресс анализа 11; монохроматора 12; блока приемников излучения 13. Блок входной оптики включает интегрирующий шар *FOIS-1* и торроидальное зеркало. В качестве приемников излучения используются трап-детектор и ФЭУ. Сигнал с трап-детектора поступает на систему регистрации, включающую пикоамперметр *Keithley 6485* или цифровой двухканальный синхронный усилитель *Ametec 7265*. При использовании ФЭУ, работающего в режиме счета фотонов, счетчик фотонов подключен через USB-порт к компьютеру. При измерениях СПЭЯ излучения и создаваемой СПЭО комплекс калибруется по эталонным лампам (дейтериевой *CL7-H* и кварцево-галогенной *BN-LH250-BC*). Для измерений СПЭЯ излучения СИД в УФ диапазоне используется специально разработанные референсные монохромные СИД [11] с пиковой длиной волны излучения 365 нм и 385 нм, которые имеют однородное распределение яркости излучения по апертуре.

Результаты метрологической аттестации комплекса

При проведении метрологической аттестации комплекса были установлены следующие основные метрологические характеристики: диапазон измерений силы света и усредненной силы света от 0,01 до 60 кд, относительная расширенная неопределенность измерений не более 2,0 %; диапазон воспроизведения угла поворота поворотных площадок в горизонтальной плоскости $\pm 110^\circ$ и в вертикальной плоскости 360° ; диапазон измерений мощности ЛИ в спектральном диапазоне от 250 до 900 нм от $3 \cdot 10^{-7}$ Вт до 10^{-1} Вт, относительная расширенная неопределенность измерений мощности ЛИ не более 2,0 %; относительная расширенная неопределенность измерений пространственного распределения силы света не более 1,04 %; относительная расширенная неопределенность измерений пространственного распределения плотности мощности ЛИ в диапазоне от 300 нВт до 300 мВт не более

9,2 %; относительная расширенная неопределенность измерений СПЭО, создаваемой СИД в диапазоне от 10^2 до 10^{10} Вт·м³ в спектральном диапазоне от 250 до 400 нм, не более 5,4 %, в диапазоне от 400 до 500 нм – не более 8,0 % и в диапазоне от 500 до 900 нм – не более 5,6 %; относительная расширенная неопределенность измерений СПЭЯ излучения СИД в спектральном диапазоне от 250 до 500 нм в диапазоне от 10^2 до 10^{12} Вт·м³·ср⁻¹ не более 7,0 %.

Заключение

В Беларуси впервые создан отечественный комплекс для измерений в спектральном диапазоне от 250 до 900 нм фотометрических, радиометрических, спектрорадиометрических и пространственных характеристик излучения твердотельных источников излучения и изделий на их основе с учетом рекомендаций *CIE-127* и *СТБ ISO 11554*. Метрологические характеристики комплекса подтверждены результатами метрологической аттестации.

Предложен уточненный метод измерений силы света и энергетической силы излучения светодиодов и лазерных диодов, основанный на предварительном исследовании пространственного распределения интенсивности излучения и измерений величин силы света и энергетической силы излучения вдоль направления оптической оси светодиодов или лазерных диодов. Обосновано применение гониометрического метода для измерений пространственного распределения силы света и плотности мощности излучения лазерных диодов, что не предусмотрено в стандартах *ISO* для лазерных диодов, однако являлось бы общей характеристикой твердотельных источников излучения. Предложен новый подход для измерений усредненного значения яркости и спектральной плотности энергетической яркости излучения светодиодов и лазерных диодов.

Комплекс расположен в Центре испытаний лазерной техники Института физики НАН Беларуси и предназначен для исследований оптических характеристик излучения создаваемых светодиодов и лазерных диодов, а также для метрологического обеспечения создаваемой и используемой оптоэлектронной техники.

Список использованных источников

1. *Bürmen, M.* LED light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their as

- essment / M. Bürmen, F. Pernuš, B. Likar / Meas. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 19. – № 12. – P. 122002.
2. Галыго, А.В. Эталонная база Республики Беларусь в области оптической радиометрии / А.В. Галыго [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 131–140.
 3. Miller, C.C. Standardization of LED measurements / C.C. Miller, Y. Ohno // LEDs Magazine. – 2004. – № 38/9. – P. 68–67.
 4. СТБ ISO 13694-2004. Оптика и оптические приборы. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний распределения плотности мощности (энергии) лазерного излучения.
 5. СТБ ISO 11146-1-2006. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения ширин, углов расходимости и параметров качества пучка. Часть 1. Стигматические пучки и пучки с простым астигматизмом.
 6. СТБ ISO 11146-2-2006. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения ширин, углов расходимости и параметров качества пучка. Часть 2. Пучки с общим астигматизмом.
 7. СТБ ISO 11146-3-2006. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения ширин, углов расходимости и параметров качества пучка. Часть 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, преобразование и методы испытаний.
 8. ГОСТ ISO 11554-2007. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения мощности, энергии и временных характеристик лазерного излучения.
 9. CIE 127:2007 Technical report CIE. Measurement of LEDs. 2nd edition Publication. – Vienna, CIE Central Bureau, 2007. – 32 p.
 10. Устройство юстировки твердотельных источников излучения : пат. № 123984, Российская Федерация, МПКG02B7/00 / В.А. Длугунович, В.А. Ждановский, А.А. Липлянин, С.В. Никоненко, О.Б. Тарасова; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № RU 123984; заявл. 03.07.2012.
 11. Эталонный монохромный светодиод : пат. № 115889, Российская Федерация, МПКG01J1/00 / А.В. Данильчик, Е.В. Луценко, С.В. Никоненко; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № RU 115889; заявл. 28.12.2011.

SETUP FOR MEASUREMENT OF THE PHOTOMETRIC, RADIOMETRIC, SPECTRAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF RADIATION OF LASER DIODES AND LEDs IN THE SPECTRAL RANGE FROM 250 TO 900 NM

Nikanenka S.V., Lutsenko E.V., Danilchuk A.V., Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Kreidzich A.V., Liplianin A.A., Rzheutski M.V.

Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Abstract. Information about principle of operation of the setup for measurement of the photometric, radiometric, spectral and spatial characteristics of radiation of laser diodes and LEDs in the spectral range from 250 to 900 nm constructed in the B.I. Stepanov Institute of Physics of NAS of Belarus and the results of its metrological certification are presented. New approaches to measure the averaged value of the luminance and spectral radiance LEDs and laser diodes, the spatial distribution of luminous intensity and power density of laser diodes radiation, the luminous intensity and radiant intensity LEDs and laser diodes.

Keywords: laser diode, LED, UV radiation.

References

1. Bürmen M., Pernuš F., Likar B. LED light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their assessment. *Meas. Sci. Technol*, 2008, vol. 19, pp. 122002.
2. Galygo A.V., Hirova N.V., Tarasova O.B., Dlugunovich V.A., Isaevich A.V., Nikanenka S.V. [Standard base of Republic of Belarus in field of optical radiometry]. *Pribory i metody izmerenij*, 2010, no. 1, pp. 131–140 (in Russian).
3. Miller C.C., Ohno Y. Standardization of LED measurements. *LEDs Magazine*, 2004, no. 38/9, pp. 68–67.
4. STB ISO 13694-2004. Optics and optical instruments. Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam power (energy) density distribution. Minsk, Gosstandart, 2004. 26 p. (In Russian).
5. STB ISO 11146-1-2006. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams. Minsk, Gosstandart, 2006. 20 p. (In Russian).
6. STB ISO 11146-2-2006. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 2: General astigmatic beams. Minsk, Gosstandart, 2006. 20 p. (In Russian).
7. STB ISO 11146-3-2006. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods. Minsk, Gosstandart, 2006. 24 p. (In Russian).
8. GOST ISO 11554-2007. Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam power, energy and temporal characteristics. Minsk, Gosstandart, 2006. 28 p. (In Russian).
9. CIE 127:2007 Technical report CIE. Measurement of LEDs. 2nd edition Publication. Vienna, CIE Central Bureau, 2007. 32 p.
10. Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Liplianin A.A., Nikanenka S.V., Tarasova O.B. *Ustrojstvo ustirovki tverdotelnykh istochnikov izluchenia* [The facilities for alignment of the solid-state sources of radiation]. Patent RF, no. 123984, 2012.
11. Nikanenka S.V., Lutsenko E.V., Danilchuk A.V. *Etalonnyj monohromnyj svetodiod* [Reference monochrome LED]. Patent RF, no. 115889, 2011.

Поступила в редакцию 04.02.2015.

PULSED KGd(WO₄)₂ RAMAN LASER: TOWARDS EMISSION LINEWIDTH NARROWING

Savitski V.G.

Institute of Photonics, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom
e-mail: vasili.savitski@strath.ac.uk

The linewidth of a KGd(WO₄)₂ pulsed Raman laser is analysed experimentally for different configurations of the Raman and pump resonators: with narrow and broadband pump emission profiles, with and without linewidth narrowing elements in the Raman laser resonator, with and without injection seeding into the Raman cavity. The benefits of a narrow linewidth pump source in combination with linewidth narrowing elements in the Raman laser cavity for the efficient linewidth narrowing of the Raman emission are explained. 20 kW peak-power pulses at 1156 nm with 0,43 cm⁻¹ emission linewidth are demonstrated from an injection seeded KGW Raman laser.

Keywords: Raman laser, Q-switching, emission linewidth.

Introduction

High average power pulsed lasers with a narrow (ideally – transform-limited) emission linewidth are essential for LIDAR (Light Detection And Ranging) applications [1, 2]. For LIDAR, better range and velocity resolution require shorter pulses and narrower emission linewidths respectively [1]. Simultaneous shortening of laser pulse duration and narrowing of the corresponding emission linewidth require generation of transform-limited pulses. A system with a high signal to noise ratio requires high average power [1], and, hence, high pulse energies or repetition rates. Higher pulse energies are usually preferable since a high repetition rate limits the range of the LIDAR system [1].

Narrow linewidth high power lasers suitable for LIDAR applications are usually based on fiber master oscillator power amplifier (MOPA) technology [3–5]. On the other hand, conversion of the pump wavelength via stimulated Raman scattering (SRS) [6] in crystalline media adds more flexibility in terms of output wavelength [7–14]. However, less work has been reported on emission linewidth narrowing in solid-state (non-fiber) Raman lasers. To the best of our knowledge there is no research targeting Raman linewidth narrowing in solid-state Raman lasers emitting in pulsed regime.

Only recently, the effect of broadening of the fundamental emission linewidth on the effective Raman gain in Raman lasers was studied [15].

In this paper a proof of concept demonstration of a narrow linewidth crystalline Raman laser operating in pulsed mode with high peak power is reported. The effect of narrow linewidth injection seeding at the Raman laser wavelength on the performance of the Raman laser is studied.

Experimental setup

The Raman laser was built around a N_g -cut KGd(WO₄)₂ (KGW) crystal, giving a positive thermal lens [16, 17] which simplifies the Raman laser cavity design. The crystal was 30 mm in length. The end faces were anti-reflection (AR) coated for 1 and 1,15 μm ($R < 0,1\%$). The source of fundamental laser emission was a diode side-pumped Nd:LiYF₄ (Nd:YLF) module emitting at 1047 nm and described in detail in [14]. The Raman shift of 901 cm⁻¹ (which corresponds to a shift of the fundamental wavelength from 1047 nm to 1156 nm) was selected by appropriate choice of the coatings of Raman laser mirrors. An intracavity Raman laser configuration [18–20], shown in Figure 1a, for wavelength conversion from 1 to 1,15 μm was chosen.

The cavities of the Nd:YLF laser and the KGW Raman laser were coupled using dichroic mirrors (DM: highly reflective (HR) at 1,1–1,25 μm , highly transmissive (HT) at 1 μm). Mirrors M1 (radius of curvature (ROC) 500 mm, HR at 1 μm) and M2 (plane, either HR at 1 μm or

a Volume Bragg Grating (VBG, OptiGrate)) formed the cavity of the Nd:YLF laser, as shown in Figure 1a. The KGW Raman laser cavity was formed by the output coupler M3 (ROC 200 mm, reflectivity of 81 % at 1,15 μm dichroic mirrors

DM and mirror M4 (ROC 250 mm, HR at 1,15 μm). The total cavity length was 340 mm. The KGW crystal was wrapped into indium foil and mounted in a brass mount. No water-cooling was provided to the crystal.

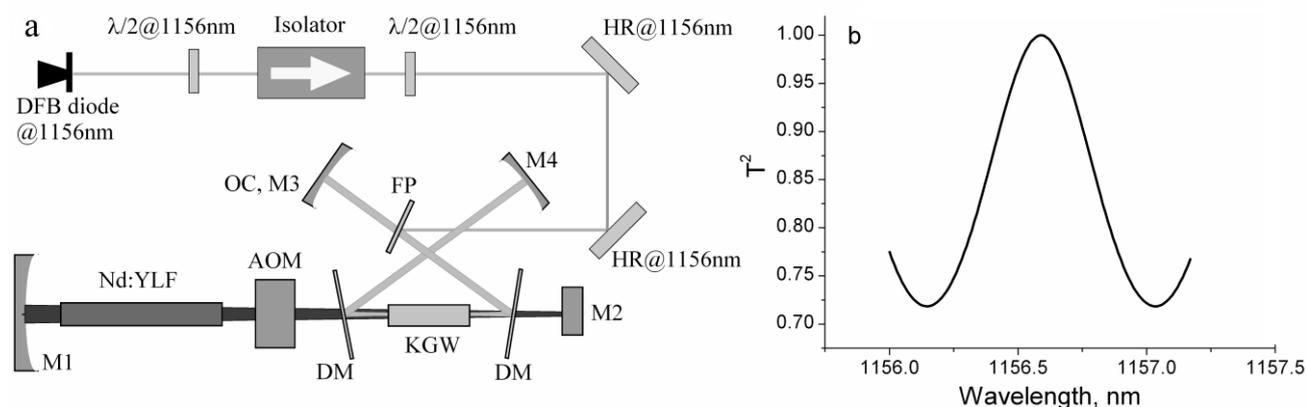


Figure 1: a – The KGW Raman laser set-up. M1: HR@1047 nm, ROC=500 mm; M2: plane, HR@1047 nm or VBG; M3: R@1156 nm 81 %, ROC=200 mm; M4: HR@1156 nm, ROC=250 mm; DM: HR@1156 nm, HT@1047 nm; FP: Fabry-Perot etalon; b – Calculated double-pass transmittance (T^2) of the FP as a function of wavelength at the angle of incidence of 7°

The Nd:YLF laser cavity (the total length of 290 mm) was designed to be stable against a thermal lens in the Nd:YLF rod with a focal length of ~ -150 mm or longer (the manufacturer specifies a focal length of -750 mm at maximum diode pump power), and, simultaneously, against a thermal lens in the KGW of 200 mm focal length or longer. The thermal lens in the KGW crystal results from the inelastic nature of Raman scattering [21]. Our calculations indicate that the main factor, influencing the fundamental (TEM_{00}) mode size of 1047 nm field in the Nd:YLF and KGW crystals is the thermal lens in the KGW. When the focal length of the thermal lens in the KGW crystal increases from 200 to 1000 mm, the TEM_{00} beam radius of the 1047 nm field increases from 190 to 345 μm in the Nd:YLF and decreases from 375 to 345 μm in the KGW. The TEM_{00} beam radii of the 1156 nm field in the KGW crystal varies from 213 to 203 μm when the focal length of thermal lens in the KGW crystal increases from 200 to 1000 mm.

The acousto-optic Q-switch (AOM) was 50 mm long and its faces were AR coated for 1047 nm ($R < 0,2$ %). The VBG had reflectivity of 99,9 % at the central wavelength of 1047,4 nm and reflectivity linewidth at full-width half-maximum (FMHW) of 0,29 nm. A 0,5 mm thick fused-silica Fabry-Perot (FP) etalon was inserted into the KGW Raman cavity during the experiments on linewidth

narrowing. Its angle with respect to the cavity axis was $\sim 7^\circ$ and was finely tuned to maximise the Raman laser output power. Transmittance of the etalon as a function of wavelength after double passing of the laser beam (T^2), which was calculated using the equation in [22] is shown in Figure 1b.

The narrow linewidth (< 4 MHz FWHM) distributed-feedback (DFB) laser diode (Toptica photonics) emitted a single transverse and longitudinal mode at 1156,6 nm was used to injection-seed [23] the Raman laser via the reflection from the Fabry-Perot etalon. It has a maximum power of 12 mW (being attenuated down to 3 mW after passing through the isolator and waveplates, see Figure 1a), and could be tuned from 1155–1157 nm. Emission from this laser diode was launched into the Raman cavity via an optical isolator. Injection seeding was not attempted without the FP etalon as it provided the only way to inject the seed emission into the Raman cavity. Despite the fact that the calculated transmittance peak of the FP etalon is at 1156,6 nm (Figure 1a), about 2 % of the seed emission could still be injected into the Raman cavity thanks to some divergence of the beam.

Emission spectra were measured by the optical spectrum analyzer (OSA, Agilent 86142B). The FWHM linewidth of the seed emission was measured to be $\Delta\nu_R = 0,06$ nm ($0,45$ cm^{-1}) and is instrument-limited by the spectral resolution of the

OSA. Therefore, the FWHM linewidths $\Delta\nu$ of the Raman and fundamental (1047 nm) emission presented below are obtained after deconvolution of the measured values $\Delta\nu_m$: $\Delta\nu = \sqrt{\Delta\nu_m^2 - \Delta\nu_R^2}$, taking into account Gaussian shapes of the instrument-limited response and measured spectra.

Experimental results

The Q-switching repetition rate (frequency) of the Nd:YLF laser giving the highest Raman laser pulse energy was assessed first. The output pulse energies at 1047 nm and 1156 nm were measured for repetition rates between 1 and 10 kHz. The output at 1047 nm was measured without the KGW crystal in the cavity and with an output coupler reflectivity of 80 % (mirror M2 in Figure 1a). The output at 1156 nm was measured with the M2 mirror being HR@1047 nm. The Raman laser pulse energy was maximized at a Q-switching frequency of 2 kHz, as shown in Figure 2. All the results presented below were obtained at this frequency. The reduced pulse energy of the Nd:YLF laser at frequencies below ~3 kHz is probably due to either amplified spontaneous emission or parasitic lasing [24].

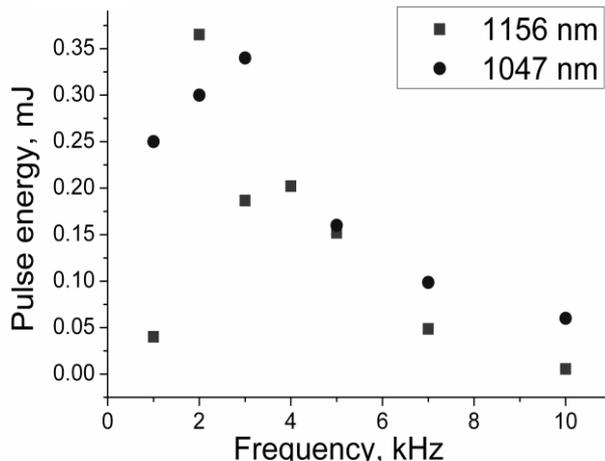


Figure 2 – Output energies of fundamental (1047 nm) and Raman (1156 nm) lasers as a function of Q-switching frequency

The performance of the KGW Raman laser was analyzed in five configurations:

- i) No linewidth control of the fundamental or Raman emission (VBG-, FP-);
- ii) Fundamental emission linewidth control with a VBG, no Raman emission linewidth narrowing (VBG+, FP-);

- iii) No fundamental emission linewidth control, Raman emission linewidth control with an intracavity etalon (VBG-, FP+);

- iv) Linewidth control of both the fundamental and Raman emission (VBG+, FP+);

- v) Linewidth control of both the fundamental and Raman emission (VBG+, FP+), with additional injection seeding of the Raman laser.

The average output power of the KGW Raman laser as a function of diode pump power launched into the Nd:YLF laser module is shown in Figure 3 for all 5 configurations. The highest output power of 1500 mW (pulse energy of 0,75 mJ) was observed for configuration i) (VBG-, FP-). Optical damage of the dichroic mirrors, which occurred at Raman output energies of ~0,7–0,75 mJ, prevented any further increase in output power.

The slope efficiencies of the Raman laser with respect to incident diode laser pump power were estimated 3,3; 3,3; 3; 2,4; and 2,4 % for Raman laser configurations i) to v) respectively. These values are lower than for systems based on end-pumped neodymium lasers due to the side-pumping scheme of the Nd:YLF laser system used in this study. The corresponding Raman laser thresholds were 26, 35, 36, 35 and 33 W.

It should be noticed that the values of the diode pump powers are given based on the manufacturer's calibration of the diode pump power with respect to diode current, and could be slightly lower due to the ageing effect of the diodes. The output power of the KGW Raman laser in configuration v), with injection seeding, was consistently higher than that in configuration iv) (i.e. with the same linewidth narrowing elements but without injection seeding).

The linewidth of the 1156 nm emission monotonically decreased in moving from configuration i) to v), as shown in Figure 4.

The minimum Raman emission linewidth at the maximum pump power of 82,5 W was 0,06 nm ($0,43 \text{ cm}^{-1}$) for configuration v) with injection seeding. The corresponding Raman laser average output power was 1,33 W (pulse energy 0,67 mJ). This Raman laser linewidth was about 30 % narrower in comparison with the one measured for laser configuration iv), i.e. without injection seeding. Moreover, as it was already mentioned above, with the injection seeding the output power was higher (for ~ 5 %) than that in configuration iv) within the entire pump power range.

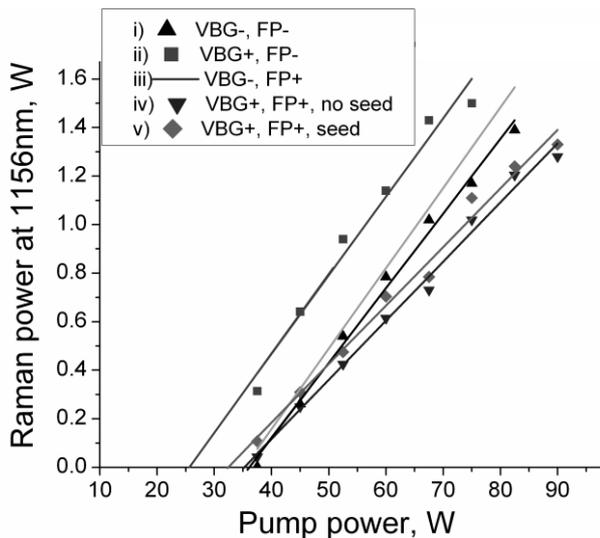


Figure 3 – Raman laser output power as functions of diode incident pump power for different cavity configurations

The 1156 nm Raman linewidth measurements together with those of the fundamental emission at 1047 nm are presented in Figure 4. The linewidth of the fundamental emission demonstrates some abnormality in its behavior: the linewidth goes up and down as a function on the diode pump power.

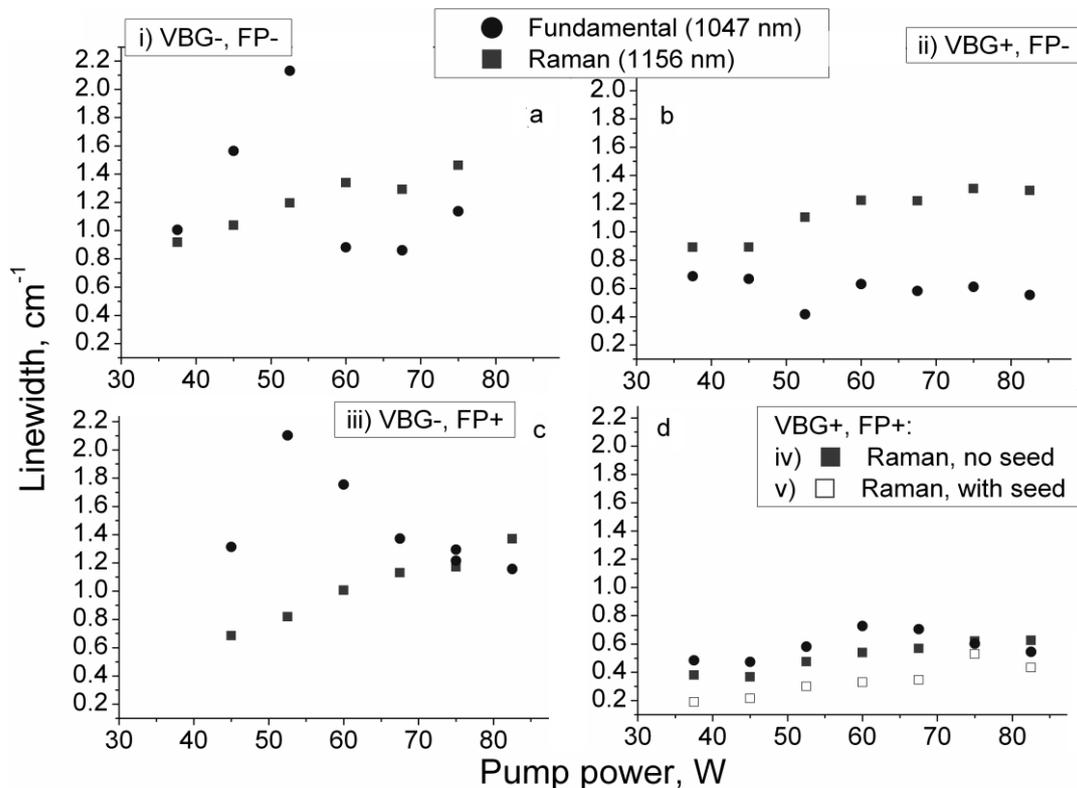


Figure 4 – Linewidths of fundamental and Raman laser emissions as function of incident diode pump power for different cavity configurations

This can be due to a complex mechanism of formation and interplay of both Raman and fundamental emissions in resonators. However, a complex study of the dynamics of fundamental emission linewidth is beyond the scope of this paper.

When no special narrowing elements are put in both fundamental and Raman laser cavities, the Raman laser emission linewidth at Raman threshold is close to that of the fundamental emission (Figure 4a). The presence of the VBG in the fundamental laser cavity narrows the 1047 nm linewidth, as shown in Figure 4b. Raman emission linewidth demonstrates some narrowing with the FP element in the Raman resonator (Figure 4c), but substantial narrowing of the Raman emission linewidth is observed only in configurations iv) and v) (Figure 4d), when linewidth narrowing elements are present in both the fundamental and Raman laser cavities. The fundamental laser emission linewidth at 1047 nm for configuration v) (VBG+, FP+, with seed) was identical to that for configuration iv).

The wavelengths of the fundamental laser for the different configurations are shown in Figure 5a. The fundamental wavelength varied by 0,04–0,06 nm around the average value of ~ 1047,28 nm without the VBG and at ~ 1047,42 nm with the VBG element.

The presence of the VBG in the fundamental laser cavity (configuration ii) does not stabilize the Raman wavelength either, as can be seen from Figure 5b, and the magnitude of the variation with the pump power was similar with and without the VBG (configuration i)). The only difference is the average wavelength: $\sim 1156,35$ nm for configuration i) and $\sim 1156,6$ nm for configuration ii), set by the Raman shift of the VBG defined fundamental wavelength. In all cases the Stokes shift between the fundamental and Raman wavelengths was ~ 901 cm^{-1} . Improved stabilization of the Raman laser wavelength (0,01 nm around the average value of 1156,6 nm) is observed when the etalon (FP) is inserted into the Raman laser cavity (configurations ii)-v)), see Figure 5b. The pulse duration of the Raman laser output did not depend on the configuration, decreasing from 36 to 32 ns as the incident pump power increased from 35 to 85 W.

Discussion

The presence of the VBG in the fundamental laser cavity moves the emission peak towards longer wavelengths, as shown in Figure 5a. The gain bandwidth in Nd:YLF crystal is $\sim 1,35$ nm [25, 26]. Therefore, it may be that the pulse energy at 1047 nm is lower with the VBG in the cavity due to a shift of the laser emission wavelength away from the Nd:YLF gain peak. Besides, the lower reflectivity of the VBG element (99,9 % at 1047 nm) compared to the HR mirror ($< 99,99$ %) is likely to have further decreased the intracavity pulse energy at 1047 nm wavelength. Lower pulse energy at 1047 nm for the same pump power is the main reason why the Raman laser threshold of 35 W in configuration ii) is higher than that in configuration i) (26 W), i.e. without VBG (Figure 3). The slope efficiency of the Raman laser, nevertheless, remains the same (3,3 %) as it is mainly determined by the Raman laser output coupler reflectivity and passive losses in the Raman cavity [27]. This in turn explains the slightly lower slope efficiency of 3 % and higher threshold (36 W) for the Raman laser in configuration iii) (VBG-, FP+), where the FP filter introduces additional losses to the Raman cavity. On the other hand, the fundamental cavity did not contain the VBG element in this case but the Raman threshold was ~ 38 % higher than that in the case of configuration i) (VBG-, FP-). This can be explained in addition by the stabilization of the Raman laser wavelength by the FP filter (see Figure 5b, black triangles), while the fundamental wavelength changes with the pump power (see Figure 5a, black triangles), thus inducing a reduction in the Raman gain in the Raman laser due to the mismatch of the fundamental and Raman wavelengths.

The lower Raman laser slope efficiency of 2,4 % for configurations iv) and v) (i.e. VBG+, FP+, with and without injection seeding) can be explained by the combined effect of the linewidth narrowing elements in both fundamental (VBG) and Raman (FP) cavities. The VBG reduces the intracavity pulse energy at the fundamental wavelength of 1047 nm, thus reducing the overall Raman gain in the Raman laser (which is proportional to a product of the Raman gain, pump intensity and the Raman crystal length [28]), while FP filter in the Raman cavity introduces additional losses for the Raman emission, similar to the configuration iii). The lower threshold of the Raman laser (33 W) in configuration v) (VBG+, FP+ with injection

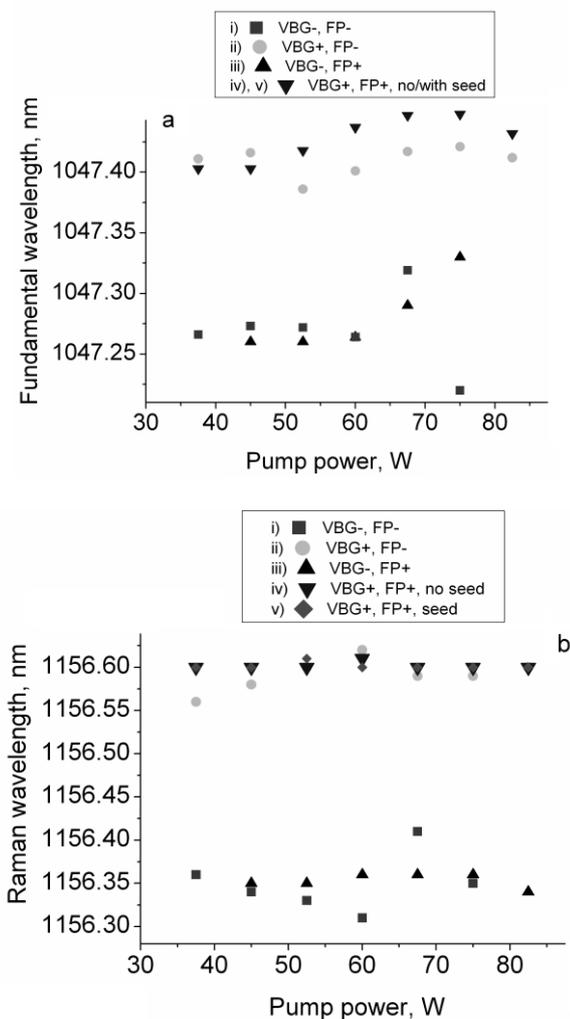


Figure 5 – Fundamental (a) and Raman (b) lasers wavelengths as functions of incident diode pump power for the different cavity configurations

seeding) compared to configuration iv) without seeding (35 W) results from the fact that the Raman field need no longer build up from noise [28]. Without the seed, the Raman noise originates from the spontaneous Raman scattering and its intensity is significantly lower than that of the seed.

The higher stability of the Raman wavelength in the configurations with the FP etalon (0,01–0,02 nm) in comparison with that without the etalon and only with the VBG in the fundamental laser cavity (0,06 nm), Figure 5b, can be explained by the narrower filter function of the FP than that of the VBG, and the higher sensitivity of the Raman laser to losses due to lower gain in comparison with the fundamental laser.

The theory of SRS [29–32] predicts that in the case of a single-mode (monochromatic) fundamental, where the fundamental linewidth is significantly narrower than the spontaneous Raman linewidth of a crystal (i.e. tends to zero), one should observe so-called gain-narrowing of the Raman laser linewidth with respect to the spontaneous Raman linewidth. This narrowing is inversely proportional to the square root of the fundamental intensity and can be as high as 6 at the threshold for SRS [28, 29, 33]. In contrast, when the fundamental linewidth is significantly broader than the spontaneous Raman linewidth of a crystal, the linewidth of the Stokes emission of the Raman laser will tend to be as broad as that of the fundamental [30, 34].

The latter case can be illustrated by a practical example [35] where intracavity pumping of a BaWO₄ Raman crystal (with the narrow Raman linewidth of 1,6 cm⁻¹) with a fundamental laser of linewidth of 1,77 cm⁻¹ led to a Raman laser emission linewidth of 1,12 cm⁻¹ at the Raman threshold (increasing to 3,74 cm⁻¹ at higher pump powers).

The present experimental research deals with the intermediate case, when the pump linewidth is not significantly narrower than the Raman linewidth (which is 5,4 cm⁻¹ in KGW crystal at 901 cm⁻¹ Raman frequency [36]). Experimental data indicate that in this case, when no special narrowing elements are put in both fundamental and Raman laser cavities, the Raman laser emission linewidth at Raman threshold is close to that of the fundamental emission (Figure 4a) similar to experimental results in [35]. Separate insertion of the emission linewidth narrowing element into either only the fundamental laser cavity or only the Raman laser cavity, in case of a KGW crystal, does not lead to any substantial narrowing of the Raman emission linewidth,

especially at pump powers above the threshold (Figure 4). The mechanism which allows the Raman laser linewidth to broaden in the presence of a broadband pump emission despite the presence of the FP etalon in the Raman cavity at high pump powers could be due to the broadening of the effective double-pass transmittance spectrum of the FP etalon (Figure 1b). This broadening will happen when the Raman laser starts to oscillate in multi-transverse mode regime at high pump powers, thus leading to increased angle of incident of the Raman beam into the FP etalon due to the increased divergence of the Raman laser beam. Raman laser in this case oscillate on adjacent etalon modes, corresponding to different angles of incident to the FP filter [37], which results in broadening of the Raman emission.

In the case of a KGW Raman crystal one should aim for linewidth narrowing elements being put into both fundamental and Raman laser cavities in order to observe substantial narrowing of the Raman laser emission, even at high pump powers. Locking of the Raman resonator oscillation frequency to that of the seed laser by controlling the resonator length would significantly narrow the Raman laser emission further.

Conclusion

The use of an N_g -cut KGW crystal in an intracavity pumped pulsed Raman laser was demonstrated. The peak power of the pulses was 20 kW and the emission linewidth was narrowed to 0,43 cm⁻¹ at 1156 nm using linewidth narrowing elements in both the fundamental and Raman cavities as well as injection seeding of the Raman resonator. Linewidth narrowing of the Raman emission was studied for different configurations of both the fundamental and Raman cavities. The analysis performed shows that narrow linewidth emission in an intracavity pumped Raman laser can be achieved efficiently by the combination of narrow linewidth pump source and linewidth narrowing elements in the Raman laser cavity. Injection seeding of Raman cavity was shown to be an effective tool for further linewidth narrowing in pulsed Raman lasers analogous to solid-state ones.

References

1. Handbook of Optoelectronics (Two-Volume Set), CRC Press, 2010.
2. Amann M.-C., Bosch T.M., Lescure M., Myllylae R.A., Rioux M. Laser ranging: a critical review of

- unusual techniques for distance measurement. *Opt. Eng.*, 2001, vol. 40, pp. 10–19.
3. Clark G.L., Harris E.D. High Power Laser Amplifier Chain Techniques, Defense Technical Information Center, 1965.
 4. Nicolaescu R., Fry E.S., Walther T. Generation of near-Fourier-transform-limited high-energy pulses in a chain of fiber-bulk amplifiers, *Opt. Lett.*, 2001, vol. 26, pp. 13–15.
 5. Renjie Z., Wei S., Petersen E., Chavez-Pirson A., Stephen M., Peyghambarian N. Transform-Limited, Injection Seeded, Q-Switched, Ring Cavity Fiber Laser, *Journal of Lightwave Technology*, 2012, vol. 30, pp. 2589–2595.
 6. Woodbury E.J., Ng W.K. Ruby Laser Operation in near IR. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1962, vol. 50, pp. 2367–2367.
 7. White J.C., Henderson D. Anti-Stokes Raman laser, *Physical Review A*, 1982, vol. 25, pp. 1226–1229.
 8. Holliday J.N. Design of a XeF-pumped second Stokes amplifier for blue-green production in H₂, *Opt. Lett.*, 1983, vol. 8, pp. 12–14.
 9. Gad G.M.A., Eichler H.J., Kaminskii A.A. Highly efficient 1.3-mm second-Stokes PbWO₄ Raman laser, *Opt. Lett.*, 2003, vol. 28, pp. 426–428.
 10. Dashkevich V.I., Orlovich V.A., Shkadarevich A.P. Intracavity Raman laser generating a third Stokes component at 1.5 mm, *Journal of Applied Spectroscopy*, 2009, vol. 76, pp. 685–691.
 11. Zhu H., Duan Y., Zhang G., Huang C., Wei Y., Shen H., Zheng Y., Huang L., Chen Z. Efficient second harmonic generation of double-end diffusion-bonded Nd:YVO₄ self-Raman laser producing 7.9 W yellow light, *Opt. Express*, 2009, vol. 17, pp. 21544–21550.
 12. Dashkevich V.I., Orlovich V. A. Ring solid-state Raman laser at 1538 nm, *Laser Physics Letters*, 2011, vol. 8, pp. 661–667.
 13. Lubeigt W., Savitski V.G., Bonner G.M., Geoghegan S.L., Friel I., Hastie J.E., Dawson M.D., Burns D., Kemp A.J. 1.6 W continuous-wave Raman laser using low-loss synthetic diamond, *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 6938–6944.
 14. Savitski V.G., Friel I., Hastie J.E., Dawson M.D., Burns D., Kemp A.J. Characterization of Single-Crystal Synthetic Diamond for Multi-Watt Continuous-Wave Raman Lasers, *IEEE J. Quantum Electron*, 2012, vol. 48, pp. 328–337.
 15. Bonner G.M., Lin J., Kemp A.J., Wang J., Zhang H., Spence D.J., Pask H.M. Spectral broadening in continuous-wave intracavity Raman lasers, *Opt. Express*, 2014, vol. 22, pp. 7492–7502.
 16. Yumashev K.V., Savitski V.G., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A., Molotkov D.D., Protasena A.L. Laser performance of N_g-cut flash-lamp pumped Nd:KGW at high repetition rates, *Appl. Phys. B-Lasers Opt.*, 2007, vol. 89, pp. 39–43.
 17. Loiko P.A., Kisel V.E., Kondratuk N.V., Yumashev K.V., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A. 14 W high-efficiency diode-pumped cw Yb:KGd(WO₄)₂ laser with low thermo-optic aberrations, *Opt. Mater.*, 2013, vol. 35, pp. 582–585.
 18. Kravtsov N.V., Naumkin N.I., Protasov V.P. Characteristics of the dynamics of stimulated Raman scattering in a gas excited by a train of short pulses, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. 5, pp. 864–865.
 19. Band Y.B., Ackerhalt J.R., Krasinski J.S., Heller D.F. Intracavity Raman lasers, *Quantum Electronics, IEEE Journal*, 1989, vol. 25, pp. 208–213.
 20. Pask H.M. Continuous-wave, all-solid-state, intracavity Raman laser, *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, pp. 2454–2456.
 21. Raman C.V., Krishnan K.S. A new type of secondary radiation, *Nature*, 1928, vol. 121, pp. 501–502.
 22. Hodgson N., Weber H. Laser Resonators and Beam Propagation. *Fundamentals, Advanced Concepts, Applications, Springer Series in Optical Sciences*, Springer New York, 2005.
 23. Erickson L.E., Szabo A. Spectral narrowing of dye laser output by injection of monochromatic radiation into the laser cavity, *Applied Physics Letters*, 1971, vol. 18, pp. 433–435.
 24. Barnes N.P., Walsh B.M. Amplified spontaneous emission-application to Nd:YAG lasers, *Quantum Electronics, IEEE Journal*, 1999, vol. 35, pp. 101–109.
 25. Bado P., Bouvier M., Coe J.S. Nd:YLF mode-locked oscillator and regenerative amplifier, *Opt. Lett.*, 1987, vol. 12, pp. 319–321.
 26. Schulz P.A. Henion S.R. 5-GHz mode locking of a Nd:YLF laser, *Opt. Lett.*, 1991, vol. 16, pp. 1502–1504.
 27. Spence D.J., Dekker P., Pask H.M. Modeling of Continuous Wave Intracavity Raman Lasers, *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal*, 2007, vol. 13, pp. 756–763.
 28. Penzkofer A., Laubereau A., Kaiser W. High-Intensity Raman Interactions, *Prog. Quantum Electron.*, 1979, vol. 6, pp. 56–140.
 29. Wang C.-S. Theory of Stimulated Raman Scattering, *Physical Review*, 1969, vol. 182, pp. 482–494.
 30. Raymer M.G., Mostowski J. Stimulated Raman scattering: Unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation, *Physical Review A*, 1981, vol. 24, pp. 1980–1993.
 31. Nonlinear spectroscopy, North-Holland and Publishing Co., 1977.
 32. Akhmanov S.A., Djakov Yu.Ye., Chirkin A.S. *Vvedeniye v statisticheskuyu radiofiziku i optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981 (in Russian)

33. Chirkov V.A., Gorelik V.S., Peregudov G.V., Sushchinskii M.M. Investigation of the line width of stimulated Raman scattering, *JETP Letters*, 1969, vol. 10, pp. 267–269.
34. Dashkevich V.I., Timofeyeva G.I., Dementyev A.S. [Raman lasers on Ba(NO₃) and KGd(WO₄)₂ crystals: a comparative analysis under pumping on $\lambda=1351$ nm]. *Lazernaya fizika i opticheskiye tekhnologii: materialy IX Mezhdunar. konf.* [Laser physics and optical technologies: IX Internat. conf. proceedings], Grodno, 2012, pp. 34–37 (in Russian).
35. Fan L., Fan Y.-X., Li Y.-Q., Zhang H., Wang Q., Wang J., Wang H.-T. High-efficiency continuous-wave Raman conversion with a BaWO₄ Raman crystal, *Opt. Lett.*, 2009, vol.34, pp. 168–1689.
36. Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Osiko V.V., Powell R.C. Comparative Spontaneous Raman Spectroscopy of Crystals for Raman Lasers, *Appl. Opt.*, 1999, vol. 38, pp. 594–598.
37. Anokhov S.P., Marusiy T.Ya., Soskin M.S. *Perestraivayemyye lazery* [Tunable lasers]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1987 (in Russian).

**ИМПУЛЬСНЫЙ ВКР-ЛАЗЕР НА KGd(WO₄)₂:
СУЖЕНИЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ ИСПУСКАНИЯ**

Савицкий В.Г.

Институт фотоники, университет Страфклайд, г. Глазго, Великобритания
e-mail: vasili.savitski@strath.ac.uk

Ширина линии испускания импульсного ВКР-лазера на KGd(WO₄)₂ экспериментально проанализирована для различных конфигураций резонаторов ВКР-лазера и лазера накачки: при узкой и широкой ширине линии испускания лазера накачки; в присутствии и отсутствии элементов, сужающих линию испускания, в резонаторе ВКР-лазера; в присутствии и отсутствии затравочного излучения в резонаторе ВКР-лазера. Объяснены преимущества использования лазера накачки с узкой шириной линии испускания в комбинации с элементами, сужающими линию испускания в резонаторе ВКР-лазера, для эффективного сужения ширины линии ВКР-излучения. Продемонстрированы импульсы с пиковой мощностью 20 кВт на длине волны 1156 нм с шириной линии излучения 0,43 см⁻¹ в ВКР-лазере на кристалле KGW с затравочным излучением.

Ключевые слова: ВКР-лазер, модуляция добротности, ширина линии излучения.

Поступила в редакцию 09.10.2014.

УДК 621.8-1/-9

БОРТОВАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Беляев Б.И.¹, Голубев Ю.В.¹, Гусев В.Ф.², Пасенюк А.А.¹, Сосенко В.А.¹

¹НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО РКК «Энергия» имени С.П. Королева, г. Королев, Московская область,
Российская Федерация
e-mail: remsens@mail.ru

Разработана бортовая система автоматической ориентации видеоспектральной аппаратуры. Описан состав системы автоматической ориентации. Рассмотрены различные варианты конструктивного построения.

Ключевые слова: платформа наведения, система ориентации видеоспектральной аппаратуры, космический эксперимент «УРАГАН».

Введение

Мониторинг опасных процессов и явлений в окружающей среде методами дистанционного зондирования позволяет не только фиксировать чрезвычайные ситуации и антропогенные явления, но и прогнозировать их развитие.

Методы визуальных наблюдений и регистрации с борта служебного модуля (СМ) Российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) катастрофических явлений и их предвестников на Земле, а также критерии классификации и дешифрирования признаков катастрофических явлений отрабатываются в космическом эксперименте (КЭ) «УРАГАН» «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф» [1].

В НИИ прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ по заказу ОАО РКК «ЭНЕРГИЯ» имени С.П. Королева создана бортовая система автоматической ориентации видеоспектральной аппаратуры, сокращенно «СОВА», с целью автоматизации процесса изменений оптических характеристик подстилающих поверхностей в КЭ «УРАГАН» [2].

Данная разработка является уникальной. Платформы, используемые для наведения ви-

деоспектральной аппаратуры на МКС, представлены только платформой, установленной вне гермообъема, в открытом космосе (двуосная платформа наведения), разработанной в ОАО «ВНИИТрансмаш».

Необходимость установки приборов в открытом космосе отражается на требованиях, предъявляемых к разрабатываемой видеоспектральной аппаратуре. В частности, для видеоспектральной аппаратуры при установке вне гермообъема необходимо стравливать газы из объективов и корпуса аппаратуры, применять дополнительную защиту от ионизирующего излучения, дополнительный обогрев аппаратуры. Существует также ряд требований, предъявляемых к механической части платформ наведения для работы в открытом космосе.

В последнее время количество видео- и фотоспектральных приборов, функционирующих в гермообъеме станции, значительно увеличилось. В результате возникла задача по автоматическому наведению полей зрения видео- и фотоспектральной техники и соответственно автоматическому получению снимков подстилающих поверхностей.

Учитывая сложности в разработке аппаратуры для работы вне гермообъема, а также большое количество фото- и видеоаппаратуры, функционирующей в гермообъеме станции,

было принято решение разрабатывать платформу, предназначенную для работы в гермо-объеме станции.

Назначение и состав

«СОВА» предназначена для установки различной научной аппаратуры (НА) видео- и фотоспектральной съемки, наведения НА и съемки по заданной программе оператором или без участия оператора на иллюминаторах СМ РС МКС и многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) МКС.

«СОВА» представляет собой платформу наведения (ПН), устанавливаемую на иллюминатор СМ РС МКС, на которой фиксируется съемочная аппаратура, и управляющий ноутбук – блок электроники (БЭ), расположенный рядом в 1,5–3 м от иллюминатора. Система «СОВА» должна обеспечивать возможность наведения полей зрения НА и отслеживания объекта по заданным координатам. В связи с необходимостью установки ПН на различные иллюминаторы СМ РС МКС платформа наведения была изготовлена в двух вариантах.

ПН «СОВА» 228 устанавливается на иллюминатор диаметром 228 мм СМ РС МКС и обеспечивает возможность поворота установленной на ней съемочной аппаратуры на $\pm 180^\circ$ вокруг оси визирования и наведения с углом отклонения не менее 20° в одной плоскости от оптической оси иллюминатора.

ПН «СОВА» 420 устанавливается на иллюминатор диаметром 420 мм как СМ РС МКС, так и МЛМ МКС и обеспечивает возможность наведения съемочной аппаратуры по двум взаимно перпендикулярным осям с углами отклонения не менее $\pm 30^\circ$.

В ходе проектирования были рассмотрены два варианта конструктивного построения ПН «СОВА» – ПН «СОВА-1» и ПН «СОВА-2».

ПН «СОВА-1». Описание и основные характеристики

Вариант ПН «СОВА-1» (рисунок 1) выполнен по схеме, когда съемочная НА закрепляется на ПН неподвижно, а сканирование поверхности Земли осуществляется при помощи зеркала, установленного на подвесе, поворачиваемом при помощи электроприводов.

ПН «СОВА-1» представляет собой связанный с опорой 7 для закрепления на иллюмина-

торе светонепроницаемый со стороны отсека МКС жесткий кожух с посадочным кольцом 8 для установки НА. Внутри кожуха находятся два зеркала: подвижное 9, закрепленное на карданном подвесе с возможностью поворота в двух плоскостях при помощи электроприводов (шаговые двигатели 3 с микрометрическими винтами 4), и неподвижное 10 («зеркало 45° »), направляющее световой поток на приемную аппаратуру. Подвижное зеркало имеет возможность поворота по каждой из осей $\pm 15^\circ$, что приводит к сканированию поверхности Земли по углам $\pm 30^\circ$.

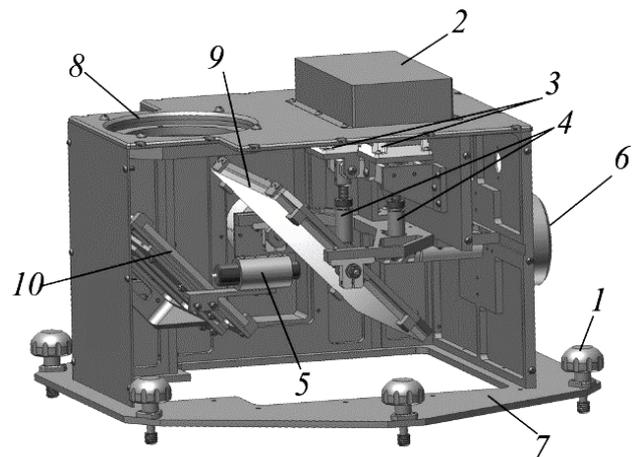


Рисунок 1 – Вариант конструктивного построения платформы наведения «СОВА-1»: 1 – винт крепления платформы наведения к иллюминатору; 2 – крышка электродвигателей; 3 – электродвигатели; 4 – винты микрометрические; 5 – съемочная камера; 6 – энкодер; 7 – опора; 8 – посадочное кольцо для съемочной аппаратуры; 9 – зеркало подвижное; 10 – зеркало неподвижное

Основания для такого конструктивного решения, т.е. организации сканирования при помощи зеркал, следующие: 1) значительная масса и габариты некоторой НА приводят к возникновению значительных моментов инерции относительно осей поворота, пропорциональных произведению массы на квадрат расстояния; 2) высокие коэффициенты отражения современных оптических зеркал (90–98%), причем как для напыленных на стекле, так и для полированных металлических (например, из алюминиевых сплавов).

ПН «СОВА-1» дополнена системой визирования наблюдаемой цели. Для этого на кронштейне установлена камера 5 соосно оси визирования. Изображение с этой камеры выводится

на экран БЭ в реальном времени. На экране также предусмотрен джойстик наведения.

В таком варианте построения системы оператор может наводить и управлять НА, установленной за светозащитным экраном, не подходя к иллюминатору. Это актуально, например, для фотосъемки, поскольку на данный момент, наведение на объект осуществляется оператором при помощи видоискателя.

ПН «СОВА-2». Описание и основные характеристики

Вариант ПН «СОВА-2» (рисунок 2) построен по «классической» для нас схеме на основе ранее разработанных систем наведения с ручным управлением.

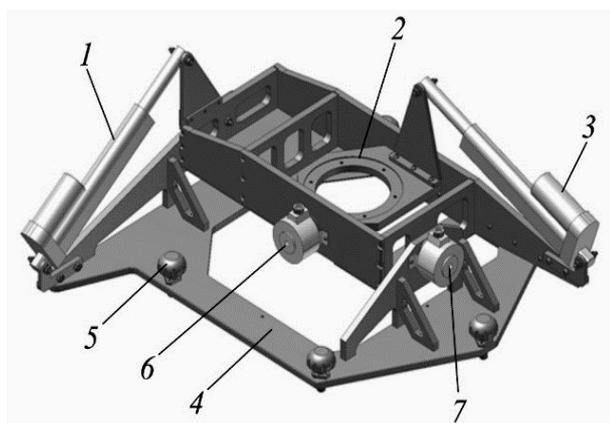


Рисунок 2 – Вариант конструктивного построения платформы наведения «СОВА-2»: 1, 3 – актуатор; 2 – посадочное кольцо для съемочной аппаратуры; 4 – опора; 5 – винт крепления платформы наведения к иллюминатору; 6, 7 – энкодер

В качестве электроприводов, обеспечивающих поворот установленной аппаратуры, использованы линейные актуаторы.

Конструкция ПН «СОВА-2» представляет собой опору 4 для крепления к иллюминатору, на которой установлены расположенные в плоскости, параллельной окну иллюминатора, и закрепленные в подшипниках качения узлы подвеса, обеспечивающие поворот кольца 2 для съемочной аппаратуры по двум взаимно перпендикулярным осям. Поворот кольца 2 осуществляется через рычаги при помощи шарнирно установленных линейных актуаторов 1 и 3. Угол поворота считывается при помощи энкодеров, установленных на одних осях с соответствующими рычагами. Ход штока актуа-

тора и плечо рычага рассчитаны таким образом, чтобы обеспечить углы отклонения $\pm 30^\circ$.

На рисунке 3 представлены варианты установки НА на ПН «СОВА».

Основанием для такого конструктивного решения могут быть: 1) относительно простая в изготовлении и калибровке конструкция в сравнении с ПН «СОВА-1», 2) возможность использования в качестве основы ранее разработанной системы наведения с ручным управлением.

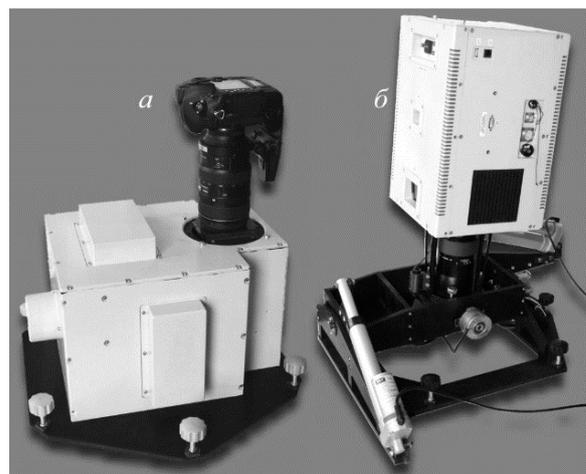


Рисунок 3 – Варианты установки научной аппаратуры на макеты платформ наведения «СОВА»: а – фотоаппарат Nikon D3, установленный на макет платформы наведения «СОВА-1»; б – видео-спектральная система, установленная на макет платформы наведения «СОВА-2»

Однако если учитывать значительные моменты инерции относительно осей поворота, которые необходимо гасить в условиях невесомости, предпочтение отдается ПН «СОВА-1» [2].

Блок электроники. Описание и основные характеристики.

БЭ предназначен для управления работой «СОВА» с помощью специального программного обеспечения (СПО) и обеспечивает включение/выключение аппаратуры, установленной на ПН, подачей команды по интерфейсу USB 2.0 по заданному временному алгоритму и обработку приводами углов наведения по командам оператора или по заранее установленной программе наведения.

БЭ включает в себя: планшетный компьютер (нетбук); контроллер управления системами наведения ПН; контроллер датчиков положения

углов отклонения ПН; блок питания двигателей систем сканирования ПН; блок питания контроллеров; блок питания планшетного компьютера.

СПО обеспечивает функционирование, контроль и управление системой «СОВА» в составе СМ РС МКС. Программа контроля и управления «СОВА» выполняет расчет времени пролета над объектом (с учетом допустимых углов съемки) и параметров наведения на объект в реальном времени; учитывает нахождение станции над дневной/ночной стороной; обеспечивает одновременную работу с несколькими объектами, ручной ввод географических координат объекта, автоматическое включение и наведение НА, сохранение/загрузку объектов на жесткий диск, оповещение фото спектральной аппаратуры о необходимости проведения съемки, ручное наведение на объект съемки, ручную съемку.

При запуске программы производится загрузка ранее сохраненных объектов и расчет времени пролета над каждым из объектов. При пролете над объектом запускается автоматическое наведение ПН на объект, синхронизация часов ПН и фотоспектральной аппаратуры, съемка объекта. Работа оператора ПН «СОВА» заключается в добавлении и удалении необходимых объектов съемки, а также при необходимости ручном наведении аппаратуры на объект съемки.

В основном окне СПО отображаются необходимые для съемки объекты подстилающей поверхности, линия терминатора, а также текущее положение МКС. Добавление объектов может осуществляться как вводом координат в ручном режиме, так и выбором произвольной точки на карте.

Заключение

Разработана платформа для автоматического наведения полей зрения фото- и видеоспектральной аппаратуры и измерения оптических характеристик подстилающих поверхностей под различными углами к надиру. Платформа наведения исполнена в двух вариантах конструктивного построения. Вариант построения ПН «СОВА-1» является предпочтительным в условиях невесомости в виду возникновения значительных моментов инерции по причине значительной массы части научной аппаратуры. Данная платформа позволит устанавливать большое количество различной фото- и видеоспектральной аппаратуры без предъявления специальных требований в сравнении с двуслойной платформой наведения, что уменьшает в свою очередь сложность изготовления аппаратуры. Учитывая большое количество фото- и видеоспектральной аппаратуры, присутствующей в данный момент в гермообъеме МКС, платформа наведения способствует увеличению получаемого объема фото- и видеоспектральных данных.

Список использованных источников

1. *Беляев, Б.И.* Фотоспектральная система для космического эксперимента «УРАГАН» / Б.И. Беляев [и др.]. Космічна наука и технологія. – 2010. - Т. 16. - № 2. – С. 41.
2. *Крот, Ю.А.* Видеоспектральная система для дистанционного зондирования земли с борта международной космической станции / Ю.А. Крот, А.В. Чумаков, В.Ф. Гусев // Приборы и методы измерения. – № 1(8). – 2014. – С. 16–21.

INTERNATIONAL SPACE STATION ONBOARD ORIENTATION SYSTEM FOR VIDEOSPECTRAL EQUIPMENT

Belyaev B.I.¹, Golubev Yu.V.¹, Gusev V.F.², Paseniuk A. A.¹, Sosenko V.A.¹

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

²S.P. Korolev rocket space company «Energia», Korolev, Moscow region, Russian Federation
e-mail: remsens@mail.ru

Abstract. The onboard orientation system for videospectral equipment has developed. The structure of automatic orientation system & constructive building of steering platform has described. Different versions of constructive building has considered.

Keywords: steering platform, onboard orientation system for videospectral equipment, space experiment «URAGAN».

References

1. Belyaev B.I., Belyaev Yu.V., Domaracki A.V., Katkovsky L.V., Krot Yu.A., Rogovec A.V., Khvalei S.V. [The photospectral system for the space experiment «URAGAN»]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya*, 2010, v. 16, № 2, p. 41 (in Russian).
2. Krot Yu.A., Chumakov A.V., Gusev V.F., A videospectral system for Earth's remote sensing on board of the International Space Station, *Pribory i metody izmerenij*, № 1(8), 2014, p. 16-21 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.01.2015.

УДК 535.23: 53.082.52

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ НА ТОЧНОСТЬ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Длугунович В.А., Исаевич А.В., Круплевич Е.А., Насенник Л.Н.

Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Исследовано влияние стабильности мощности и спектральных характеристик излучения лазеров, входящих в состав комплекса установок для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, который обеспечивает воспроизведение единицы средней мощности лазерного излучения в динамическом диапазоне от 10^{-7} до 40 Вт и единицы энергии лазерного излучения – от 10^7 до 100 Дж с относительной стандартной неопределенностью, не превышающей 3 % в спектральном диапазоне от 0,2 до 10,6 мкм, на результаты калибровки средств измерений.

Ключевые слова: калибровка, мощность, энергия, лазерное излучение.

Введение

Высокая точность в сочетании с широким динамическим и спектральным диапазонами измерений современных средств измерений (СИ) мощности и энергии лазерного излучения (ЛИ) предъявляют повышенные требования к установкам для их калибровки, которые должны обеспечивать хранение, воспроизведение и передачу размера единиц средней мощности и энергии ЛИ калибруемым СИ.

При этом точность, динамический и спектральный диапазоны измерений калибровочных установок должны быть значительно выше, чем у калибруемых СИ.

Одним из условий воспроизведения размера единиц средней мощности и энергии излучения в широком спектральном диапазоне с минимальной неопределенностью является комплекция калибровочных установок высокостабильными источниками ЛИ, обеспечивающими генерацию излучения во всем спектральном диапазоне с требуемыми параметрами.

Цель работы – исследовать основные характеристики излучения лазерных источников, оказывающие наибольшее влияние на точность калибровки СИ средней мощности и энергии ЛИ: стабильность мощности и энергии, спектральные характеристики (длину волны, спектральную ширину полосы) излучения; использовать результаты исследований при создании

комплекса установок для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ.

Энергетические и спектральные характеристики источников лазерного излучения, входящих в состав установок для калибровки средств измерений мощности (энергии) лазерного излучения

Основными параметрами источников ЛИ для установок комплекса, которые необходимо учитывать при их выборе, являются, в первую очередь: динамический диапазон выходной мощности (энергии) ЛИ, долговременная стабильность мощности (энергии) излучения, его спектральный диапазон, спектральный состав и спектральная ширина полосы излучения, а также характеристики надежности лазеров (рабочий ресурс, шумы, устойчивость к напряжениям радиопомех, создаваемых на портах электропитания). Кроме того, при выборе лазеров важны пространственные характеристики пучка излучения и поляризация ЛИ.

При калибровке СИ мощности (энергии) ЛИ наибольшее влияние на суммарную стандартную неопределенность определения калибровочного коэффициента имеет долговременная стабильность мощности (энергии) ЛИ. Согласно требованиям стандарта [1] стабильность мощности ЛИ характеризуется относительной статистической флуктуацией мощности ЛИ ΔP за интервал вре-

мени измерения выбранного типа стабильности, которую вычисляют по формуле:

$$\Delta P = 2s/\bar{P},$$

где $\bar{P} = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) / n$ – среднее значение мощности

ЛИ; $s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 / (n-1) \right)}$ – стандартное

отклонение; n – количество измерений.

Стабильность мощности излучения лазеров зависит от ряда факторов: типа, конструкции и режима работы лазеров, а также от условий их эксплуатации и параметров накачки.

На рисунке 1 проиллюстрирована зависимость долговременной стабильности мощности излучения (3600 измерений в течение 1 ч) лазерного модуля MDL-H-880nm-2W от уровня выходной мощности. Видно, что при прочих одинаковых факторах стабильность мощности излучения при различных уровнях выходной мощности может отличаться более чем в 3 раза.

Результаты измерений долговременной стабильности мощности ЛИ, проводимых в соответствии с требованиями стандарта [1] для разных уровней мощности ЛИ лазеров, входящих в состав установки для калибровки СИ мощности ЛИ (УКСИМ), представлены в таблице 1. Установлено, что используемые в установке УКСИМ лазеры обладают высокой долговременной стабильностью мощности излучения, которая изменяется в зависимости от уровня выходной мощности лазеров и их типа в пределах от 0,02 % до 3,0 %.

Стабильность энергии импульса ЛИ характеризуется относительной статистической флуктуацией энергии импульса ΔQ , которую согласно требованиям стандарта [1] вычисляют аналогично статистической флуктуации мощности ЛИ ΔP по формуле:

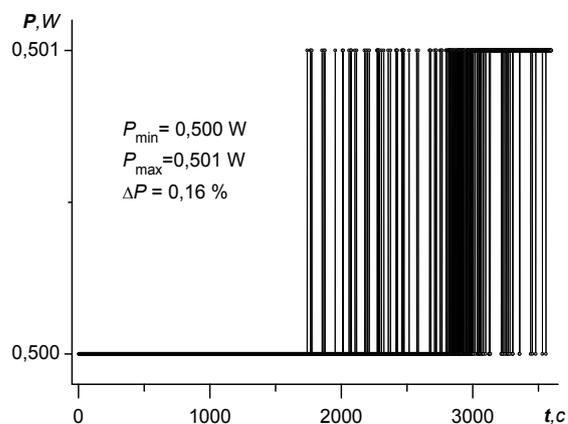
$$\Delta Q = 2s/\bar{Q},$$

где $\bar{Q} = \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) / n$ – среднее значение энергии

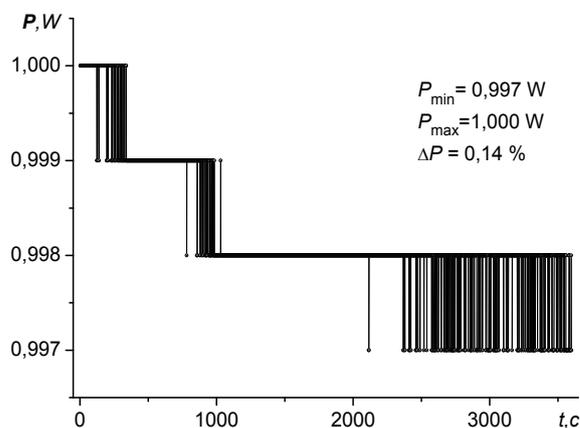
импульса; $s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 / (n-1) \right)}$ – стандарт-

ное отклонение; n – количество измерений. Измерения выполняют для 100 последовательных (если

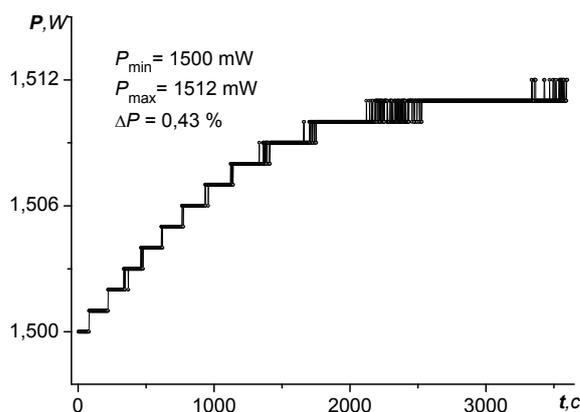
возможно) импульсов. Если это невозможно, то разрешается использовать 100 импульсов, которые непосредственно не следуют друг за другом.



а



б



в

Рисунок 1 – Временные зависимости выходной мощности излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W при уровнях мощности лазерного излучения: а – 500, б – 1000, в – 1500 мВт

Данные, представленные в таблице 1, получены авторами в центре испытаний лазерной техники на установке для измерения средней мощности непрерывного ЛИ и поверки средств измерения средней мощности ЛИ, комплексе установок для измерения спектральных характе-

ристик лазерного излучения и на установке для измерения стабильности мощности ЛИ [2, 3].

Значения стабильности энергии лазеров, входящих в установку для калибровки средств измерений энергии ЛИ (УКСИЭ), представлены в таблице 2.

Таблица 1

Источники непрерывного лазерного излучения установки для калибровки средств измерений мощности лазерного излучения и их характеристики

Модель лазера	Средняя мощность, Вт	Долговременная стабильность, %	Длина волны, нм
МЛ800-0405-100	0,005–0,1	0,4–1,0	404
МЛ800-0447-700	0,005–0,7	0,02–0,08	450
LCS-DTL-322	0,005–2,1	0,8–1,8	532
LRD-635-TFM-200-01	0,27	0,49	635
56ICS153	0,03	0,1	662
МЛ800-0750-1000	0,005–1,1	0,1–0,3	748
MDL-N-808nm-10W	0,1–10,5	0,15	808
MDL-H-880nm-2W	0,1–2,1	0,2–0,5	878
ATC-C3000-500-AMF-975-10	0,01–3,0	0,9–3,0	975
LCS-DTL-318	0,005–0,5	0,13–0,86	1 064
MIL-III-1342nm-800mW	0,1–0,92	0,11–0,26	1 342
LRD-1560-NFM-00500-03	0,69	0,76	1 562
Firestar V30	0,1–59,2	1,4–1,8	10 600

Таблица 2

Источники импульсного лазерного излучения установки для калибровки средств измерений мощности лазерного излучения и их характеристики

Модель лазера	Длина волны, нм	Длительность импульса, с	Максимальная энергия, Дж	Стабильность, %
LS-2134	266	$11 \cdot 10^{-9}$	0,029	5,0
	355	$11 \cdot 10^{-9}$	0,036	5,0
	532	$11 \cdot 10^{-9}$	0,15	3,0
	1064	$11 \cdot 10^{-9}$	0,25	2,5
LQ929	532	$9 \cdot 10^{-9}$	0,88	3,0
	1064	$9 \cdot 10^{-9}$	1,48	2,5
L-1064/755	755	$5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	20	3,0
	1064	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	100	3,0
ЛТИ-139	1535	$3 \cdot 10^{-6}$	0,12	3,5

Анализ характеристик существующих измерителей мощности (энергии) ЛИ показал, что существенными отличиями современных измерителей энергетических характеристик ЛИ являются широкий спектральный и динамический диапазоны измерений в сочетании с высокой точностью, которые достигаются за счет использования как различного вида термоэлектрических, так и фотоэлектрических, пироэлектрических и других типов первичных приемных оптоэлектрических преобразователей. Однако чувствительность современных измерителей энергетических характеристик ЛИ достаточно сильно зависит от длины волны и спектрального состава излучения. Особенно такая сильная зависимость наблюдается для фотодиодных измерителей мощности (энергии) ЛИ, основанных на преобразовании энергии фотонов оптического излучения в электрические сигналы. Поэтому калибровка таких СИ должна проводиться с использованием источников ЛИ, длины волн излучения которых незначительно отличаются от рабочих длин волн излучения, на которых осуществляется эксплуатация СИ мощности (энергии) ЛИ. А это предполагает наличие в установках для калибровки СИ мощности (энергии) ЛИ набора источников ЛИ, генерирующих излучение на различных длинах волн.

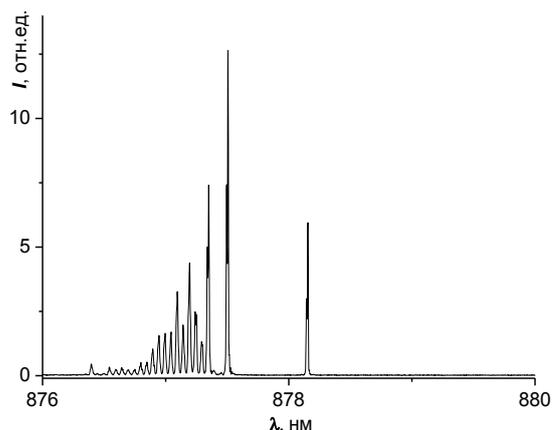
Подтверждением этому является сравнение результатов измерений средней мощности излучения лазерных модулей МЛ800-0405-100 (длина волны излучения $\lambda = 404$ нм), МЛ800-0447-700 ($\lambda = 450$ нм) и МЛ800-0750-1000 ($\lambda = 748$ нм) с помощью эталонного измерителя установки для измерения средней мощности непрерывного ЛИ и поверки СИ средней мощности ЛИ [2], а также измерителя «LaserStar» фирмы «Ophir Optronics» с различными измерительными фотодиодными (PD300-SH, PD300-3W-V1, PD300-UV-SH) и термоэлектрическими детекторами (10A-P-V2-SH, 30A-SH-V1). Калибровка измерительных детекторов «Ophir Optronics» проводилась на длине волны излучения 1064 нм, спектральная чувствительность детекторов корректировалась автоматически с помощью набора соответствующих коэффициентов. При измерениях мощности ЛИ с длиной волны 748 нм показания эталонного СИ и измерителя «LaserStar» с различными измерительными детекторами отличались не более чем на 2 %.

Такие же различия показаний наблюдаются и для ЛИ с длинами волн 404 и 450 нм при сравнении эталонного СИ и измерителя «La-

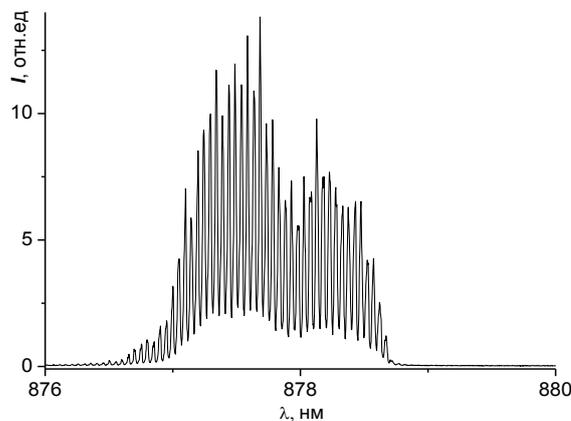
serStar» с термоэлектрическими измерительными детекторами. Однако для фотодиодных детекторов, чувствительность которых в этом спектральном диапазоне резко изменяется, эти различия превышали 10 %.

Измерения спектральных характеристик лазеров проводились на комплексе установок для измерений спектральных характеристик ЛИ [3] в соответствии с требованиями стандарта [4]. Результаты измерений длин волн излучения лазеров, используемых в установках комплекса, представлены в таблицах 1 и 2. Видно, что обеспечен достаточно широкий динамический диапазон средней мощности и энергии ЛИ в спектральной области от 0,2 до 10,6 мкм.

С изменением мощности генерации используемых в установке полупроводниковых лазеров и лазеров с диодной накачкой изменяются спектральные характеристики генерируемого ими излучения. Это видно на примере спектрального распределения плотности мощности излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W с длиной волны генерации 878 нм при уровнях выходной мощности ЛИ 560, 1300 и 2100 мВт (рисунок 2).



а



б

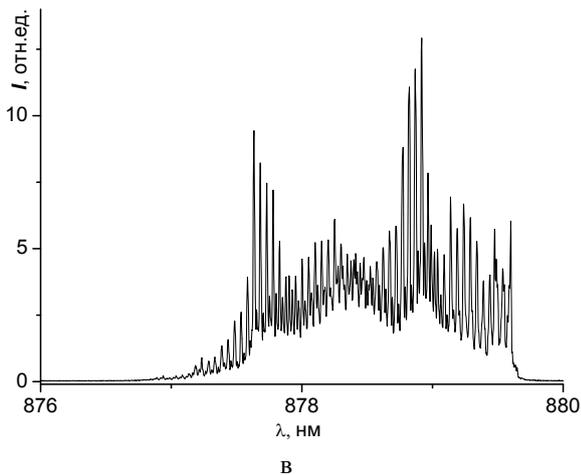


Рисунок 2 – Спектры излучения лазерного модуля MDL-H-880nm-2W при мощностях лазерного излучения: а – 560, б – 1300, в – 2100 мВт

С увеличением мощности генерации происходит изменение структуры спектра излучения, а также его сдвиг в длинноволновую область, обусловленный температурным изменением ширины запрещенной зоны активной среды лазера и дисперсионно-температурной зависимостью эффективного показателя преломления оптического микрорезонатора.

Сдвиг спектра при изменении мощности ЛИ составляет несколько нанометров и для ряда лазеров длина волны излучения практически линейно возрастает с увеличением мощности ЛИ (используются промышленно выпускаемые лазеры, стабилизация всех параметров и характеристик предусмотрена конструкцией лазера) (рисунок 3).

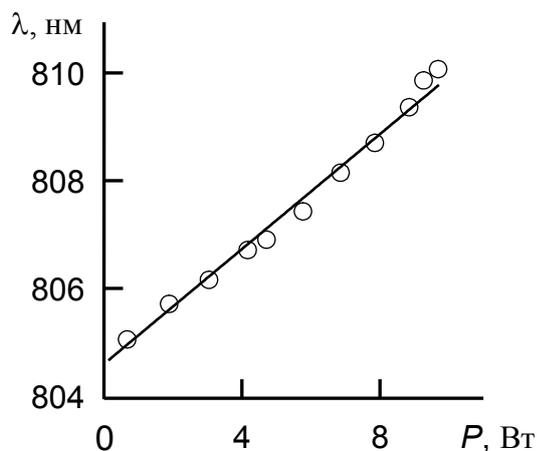


Рисунок 3 – Зависимость центральной длины волны излучения лазерного модуля MDL-N-808nm-10W от мощности лазерного излучения

Такие изменения спектральных характеристик ЛИ необходимо учитывать при калибровке измерителей мощности (энергии) ЛИ, чувствительность которых сильно зависит от длины волны и спектрального состава излучения (например, фотодиодных).

Схема построения, принцип работы и элементная база установок комплекса

Проведенные исследования позволили реализовать требования, предъявляемые к калибровочным установкам, в Институте физики НАН Беларуси, где на основе современной элементной базы создан комплекс для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ ИСО 11554-2007 и СТБ МЭК 61040-2004, гармонизованных с международными нормами [1, 5]. Комплекс входит в систему эталонов, измерительных и калибровочных установок, обеспечивающих систему единства измерений в области лазерной техники в Республике Беларусь [6, 7].

В состав комплекса для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ вошли установки УКСИМ и УКСИЭ. Анализ тенденций развития эталонных калибровочных установок показал, что в настоящее время существует несколько схем построения установок для калибровки СИ мощности и энергии ЛИ [8]. Каждая схема имеет свои достоинства и недостатки, а также область применения. Выбор был сделан в пользу последовательной схемы калибровки СИ с использованием приемника-«свидетеля».

Преимуществом данной схемы является то, что по сравнению с параллельной схемой она обеспечивает более высокие метрологические характеристики воспроизведения единиц средней мощности либо энергии ЛИ и передачи их размера, имеет менее жесткие требования к стабильности мощности ЛИ и позволяет использовать в составе установок менее мощные лазеры. Кроме того, использование приемника-«свидетеля» позволяет сэкономить рабочий ресурс эталонного СИ.

Структурная схема с использованием последовательного способа воспроизведения единицы средней мощности (энергии) ЛИ и передачи ее размера, предполагает измерения значений мощности (энергии) ЛИ с помощью эталонного СИ и последующей установки на его место калибруемого СИ. При этом с помощью приемника-«свидетеля», на который отводится

часть излучения лазера, фиксируется возможное относительное изменение мощности (энергии) источника ЛИ в процессе проведения передачи размера соответствующей единицы.

Блок-схема установок комплекса приведена на рисунке 4. Излучение лазера 1 с помощью оптической системы формирования пучка 2 направляется на приемный элемент эталонного СИ 5, а затем на калибруемое СИ 6, которое устанавливается вместо образцового СИ. Часть ЛИ с помощью светоделительной пластинки 3 направляется на приемник-«свидетель» 10, с помощью которого производится контроль стабильности мощности (энергии) ЛИ в процессе проведения калибровки. Для обеспечения калибровки СИ средней мощности (энергии) ЛИ в заданных точках динамического диапазона используются ослабители излучения 4. Калибровка приемника-«свидетеля» осуществляется путем сличения его показаний с показаниями эталонного СИ 5. Сигналы с эталонного СИ и приемника-«свидетеля» через устройства согласования 7 и 9 поступают на персональный компьютер 8, с помощью которого выполняется обработка сигналов и осуществляется управление работой установок.

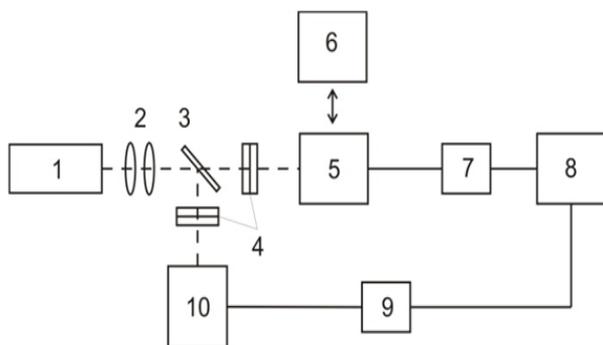


Рисунок 4 – Блок-схема установок для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения: 1 – блок излучателей; 2 – блок формирования пучка; 3 – светоделительная пластинка; 4 – ослабители лазерного излучения; 5 – эталонное средство измерения; 6 – калибруемое средство измерения; 7 и 9 – устройства согласования; 8 – персональный компьютер; 10 – приемник-«свидетель»

Анализ требований заказчиков к калибровке СИ, используемых в Республике Беларусь, показал, что спектральный диапазон комплекса должен составлять от 0,2 до 10,6 мкм. Поэтому блок излучателей установки комплекса УКСИМ был укомплектован лазерами, обеспе-

чивающими двенадцать рабочих длин волн и динамический диапазон от 10^{-7} до 40 Вт при воспроизведении единицы средней мощности ЛИ и калибровке СИ. Динамический диапазон установки для калибровки СИ энергии УКСИЭ составляет от 10^{-7} до 100 Дж и обеспечивается пятью рабочими длинами волн при воспроизведении единицы энергии ЛИ и калибровке СИ.

Метрологические характеристики комплекса

При проведении метрологической аттестации установок комплекса УКСИМ и УКСИЭ оценивались суммарные относительные стандартные неопределенности воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии ЛИ (таблица 3), а также их составляющие для малых, средних и больших уровней мощности (энергии). Суммарная относительная стандартная неопределенность воспроизведения размера единицы средней мощности ЛИ $u_{rel,c}$ на УКСИМ рассчитывалась по формуле:

$$u_{rel,c} = \sqrt{u_{rel}^2(\bar{P}) + u_{rel,\varepsilon}^2 + u_{rel,p}^2 + u_{rel,n}^2 + u_{rel,\tau}^2 + u_{rel,\varepsilon\tau}^2},$$

где $u_{rel}(\bar{P})$ – относительная стандартная неопределенность результата измерений среднего значения мощности; $u_{rel,\varepsilon}$ – относительная стандартная неопределенность измерения средней мощности ЛИ, обусловленная систематическим изменением свойств измерительной системы и определяемая через отклонения показаний \bar{P} эталонного измерительного преобразователя (ЭИП) УКСИМ от значений мощности излучения $P_{\varepsilon\tau}$, измеряемой мобильным эталоном средней мощности; $u_{rel,p}$ – относительная стандартная неопределенность, обусловленная разрешающей способностью ЭИП УКСИМ; $u_{rel,n}$ – относительная стандартная неопределенность передачи размера единицы мощности ЛИ, обусловленная непостоянством свойств дополнительного приемника излучения («свидетеля»); $u_{rel,\tau}$ – относительная стандартная неопределенность измерения коэффициента пропускания τ ослабителей ЛИ, установленных перед измерителем мощности; $u_{rel,\varepsilon\tau}$ – относительная стандартная

неопределенность измерений мощности излучения на мобильном эталоне средней мощности, оцененная при его аттестации.

Таблица 3

Максимальные значения суммарной относительной стандартной неопределённости $u_{rel,c}$ воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии лазерного излучения

Мощность		Энергия	
Длина волны, нм	$u_{rel,c}$, %	Длина волны, нм	$u_{rel,c}$, %
405	1,8	355	2,9
450	0,9	532	2,6
532	2,1	755	2,8
636	2,6	1064	2,7
750	1,2	1535	2,3
808	2,6		
879	2,7		
975	2,9		
1064	2,1		
1342	2,1		
1560	2,3		
10600	2,5		

Суммарная относительная стандартная неопределенность воспроизведения размера единицы энергии ЛИ $u_{rel,c}$ на УКСИЭ рассчитывалась по аналогичной формуле.

В результате метрологической аттестации установлено, что суммарная стандартная неопределённость воспроизведения размера единицы средней мощности и энергии ЛИ на установках комплекса не превышает 3 %.

Заключение

Исследованы зависимости суммарной стандартной неопределенности калибровки средств измерений мощности (энергии) лазерного излучения от спектральных характеристик и стабильности мощности (энергии) излучения лазеров, входящих в состав комплекса для калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения.

Результаты исследований использованы при создании комплекса для калибровки

средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, позволяющего расширить динамический и спектральный диапазоны калибровки средств измерений мощности и энергии лазерного излучения, уменьшить неопределенности измерений, более полно удовлетворять запросы по калибровке предприятий и организаций, производящих и использующих лазерную технику.

Список использованных источников

- ГОСТ ИСО 11554-2007. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения мощности, энергии и временных характеристик лазерного излучения. Введ. 2008–06–01. Минск : Госстандарт, 2008. – 18 с.
- Kruplevich, E. Setup for cw laser average power and pulse laser energy measurements and laser average power and laser pulse energy detectors calibration / E. Kruplevich, L. Nasennik, V. Chernikov // Proceed. SPIE. – 2006. – Vol. 6251. – P. 62510N-1–6.
- Исаевич, А.В. Комплекс установок для измерения спектральных характеристик лазерного излучения / А.В. Исаевич, В.С. Черников, А.В. Холенков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. физ.-мат. науки. – 2008. № 6. – С. 137–145.
- СТБ ИСО 13695-2005. Оптика и фотоника. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний при определении спектральных характеристик лазеров. – Минск : Госстандарт, 2006. – 22 с.
- СТБ МЭК 61040-2004. Детекторы, измерительные приборы и оборудование для измерения мощности и энергии лазерного излучения. – Минск : Госстандарт, 2005. – 8 с.
- СТБ 8014-2000. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения. – Минск : Госстандарт, 2001. – 9 с.
- СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – Минск : Госстандарт, 2007. – 28 с.
- Иванов, В.С. Фотометрия и радиометрия оптического излучения. Книга 1. Введение в фотометрию и радиометрию лазерного излучения / В.С. Иванов, А.Ф. Котюк. – М. : Полиграфсервис, 2000. – 192 с.

**EFFECT OF LASERS CHARACTERISTICS ON THE ACCURACY
OF LASER METERS CALIBRATION**

Dhugunovich V.A., Isaevich A.V., Kruplevich E.A., Nasennik L.N.

Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by

Abstract. Investigated the influence of power stability and spectral characteristics of the radiation of the lasers included in the complex of setups for calibration of laser power and energy meters which provides reproducibility of the unit of average laser power in the range from 10^{-7} to 40 W and laser energy in the range from 10^{-7} to 100 J with a relative standard uncertainty not more than 3 % at the wavelengths range from 0,2 up to 10,6 μm for the results of calibration of measuring instruments.

Keywords: calibration, power, energy, laser radiation.

References

1. GOST ISO 11554-2007. Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam power. Energy and temporal characteristics. Minsk, Gosstandart, 2008, 18 p. (In Russian).
2. Kruplevich E., Nasennik L., Chernikov V. Setup for cw laser average power and pulse laser energy measurements and laser average power and laser pulse energy detectors calibration. *Proceed. SPIE*, 2006, vol. 6251, pp. 62510N-1–6.
3. Isaevich A.V., Chernikov V.S., Holenkov A.V. [Complex of setups for measurement of the spectral characteristics of the laser radiation]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ser. fiz.-mat. nauki*, 2008, no. 6, pp. 137–145 (in Russian).
4. STB ISO 13695-2005. Optics and photonics. Lasers and laser-related equipment. Test methods for the spectral characteristics of lasers. Minsk, Gosstandart, 2006, 22 p. (In Russian).
5. STB IEC 61040-2004. Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation. Minsk, Gosstandart, 2005, 8 p. (In Russian).
6. STB 8014-2000. System for ensuring the uniformity of measurements of Byelorussia. Measuring instrument calibration. Organization and procedure. Minsk, Gosstandart, 2001, 9 p. (In Russian).
7. STB ISO / IEC 17025-2007. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Minsk, Gosstandart, 2007, 28 p. (In Russian).
8. Ivanov V.S., Kotjuk A.F. *Fotometriya i radiometriya opticheskogo izlucheniya. Kniga 1. Vvedenie v fotometriyu i radiometriyu lazernogo izlucheniya* [Photometry and radiometry of the optical radiation. Book 1. Introduction to the photometry and radiometry of the laser radiation]. Moscow, Poligraf servis Publ., 2000, 192 p.

Поступила в редакцию 29.09.2014.

УДК 616.713:616.12-089; 681.3

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕМОДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОМЕТРИИ И РАСШИРЕННОЙ ТОНОМЕТРИИ

Шилько С.В.¹, Кузьминский Ю.Г.¹, Борисенко М.В.²

¹ Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь
e-mail: shilko_mpri@mail.ru

Изложены результаты разработки специализированного программно-аппаратного комплекса «СПАС» для биомеханической диагностики сердца и сосудов методом осциллометрии. Дана оценка возможностей реализации аппаратной части на базе тензометрической станции TS-32.

Ключевые слова: диагностика, гемодинамика, осциллометрия, тензометрия, тонометр.

Введение

Как известно, распространение заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС) среди людей трудоспособного возраста значимо влияет на демографическую ситуацию, экономическую и многие другие сферы общественной жизни. К сожалению, сердечно-сосудистые заболевания часто развиваются бессимптомно, не проявляясь клинически. Актуально создание мобильных и недорогих автоматизированных программно-аппаратных комплексов для превентивной диагностики (скрининга) кардиопатологий, способствующей снижению риска серьезных сбоев гемодинамики и даже летальных исходов, зачастую происходящих на рабочем месте или в ходе спортивной деятельности (тренировок, состязаний).

Существующие методы и технические решения для диагностики и мониторинга функционального состояния ССС, основанные на применении электрофизиологических, ультразвуковых, рентгеновских и т.п. методов, реализованы в стационарных и дорогостоящих приборах. Они используются, как правило, в клинической практике и малоприспособны для массовых и регулярных обследований, а также самодиагностики. Вместе с тем, исследования в области физиологии сердечных сокращений выявляют значительные возможности биомеханических методов, в особенности методов тоно-

метрии и осциллометрии [1–11]. В частности, для повышения информативности измерений представляет интерес модификация описанного в работах авторов [9, 10] программно-аппаратного комплекса (ПАК) «СПАС», реализующего классическую тонометрию.

Целью настоящего исследования является расширение диагностических возможностей ПАК «СПАС» на основе совместного использования методов осциллометрии и тонометрии, соответствующей модификации программного обеспечения, а также применения современной тензометрической приборной базы.

Аппаратная реализация

Как показано в работах [9, 10], использование специализированного ПАК «СПАС» позволяет быстро и при минимальных затратах определить большую группу параметров гемодинамики сердца и сосудов. Целесообразно использовать эту разработку для проведения еще более информативной биомеханической диагностики, основанной на анализе пульсовой волны, получаемой методом осциллометрии.

В настоящем исследовании для получения первичной информации производилась регистрация осцилляций давления в манжете полуавтоматического тонометра с последующим преобразованием сигнала при помощи электронных тензометров, широко применяемых в эксперименталь-

ной механике для усиления и нормирования сигналов датчиков деформации. В частности, авторы использовали серийный тонометр *LD-1* и многоканальную тензометрическую станцию (тензостанцию) *TS-32* (Институт прикладной физики НАНБ) со специально модифицированным каналом, позволяющим обрабатывать динамический барометрический сигнал, обеспечивая диагностику сердечно-сосудистой системы в режиме реального времени.

Аппаратная часть экспериментального образца модифицированного комплекса включает следующие функциональные блоки: тонометр *LD-1*; тензостанцию *TS-32*, оснащенную *Bluetooth*; внешний *Bluetooth* ноутбука; драйвер тензостанции и кабель соединения тензостанции непосредственно с манометрическим датчиком тонометра. Измеряемые осцилляции давления преобразуются тензостанцией в цифровой код; данные по *Bluetooth*-интерфейсу с частотой 120 Гц передаются в компьютер, где регистрируются и отображаются драйверной программой тензостанции, а затем переносятся в архивный *EXCEL*-файл для хранения и последующей обработки. Перечисленные блоки допускают миниатюрные аппаратные решения для автономной работы, что важно для применения в спорте и других мобильных приложениях.

Процедура измерения

Источником первичного сигнала является датчик давления, расположенный в окклюзионной манжете полуавтоматического тонометра. В соответствии с методом осциллометрии [2–6, 10] на стадии компрессии в манжете создается давление, при котором происходит окклюзия (закрытие) плечевой артерии. Используемый в полуавтоматическом тонометре алгоритм управления обеспечивает снижение давления (декомпрессию) с постоянной скоростью до величины, достаточной для определения среднединамического артериального давления пациента. При этом в окклюзионной манжете появляются слабые пульсации давления (осцилляции), отражающие гемодинамические процессы в артерии.

Метод осциллометрии обычно подразумевает непосредственное определение среднего гемодинамического давления P_{cp} , при котором амплитуда пульсаций в окклюзионной манжете достигает максимума. Значение систолического давления P_{max} регистрируется в момент резкого увеличения амплитуды пульсаций, а значение

диастолического давления P_{min} – в момент резкого снижения амплитуды. В большинстве методик систолическое давление P_{max} определяется исходя из максимального значения производной функции амплитуд осцилляций по давлению в манжете тонометра, среднее гемодинамическое давление P_{cp} – по нулевому значению производной, а диастолическое давление вычисляется по известным формулам.

На рисунке 1 приведены зависимости амплитуды осцилляций и ее первой производной от давления в манжете в покое и при нагрузочном тестировании физически подготовленного обследуемого (спортсмена). Их сопоставление свидетельствует о значительном изменении состояния сердечно-сосудистой системы обследуемого при нагрузочном тестировании.

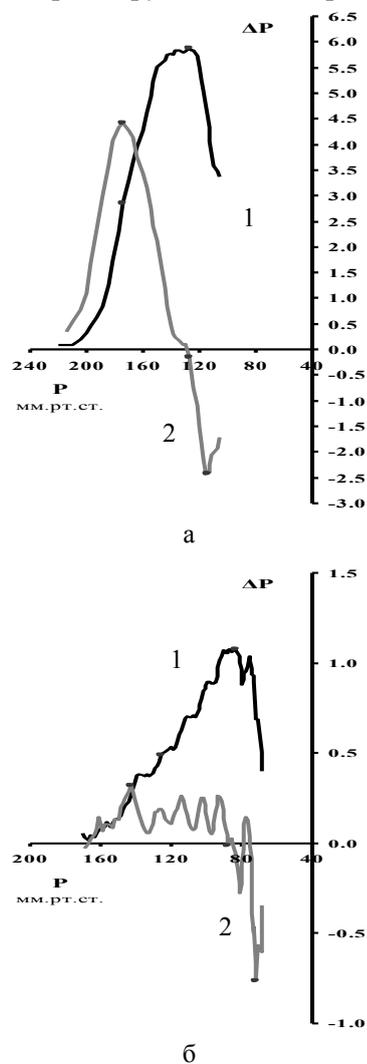


Рисунок 1 – Зависимости амплитуды осцилляции давления ΔP (1) и ее первой производной $d(\Delta P)/dP$ (2) от давления в манжете тонометра в состоянии покоя (а) и при значительной физической нагрузке (б)

Для анализа получаемых осциллометрических данных в разработанном ПАК используется компьютерная программа СПАС 1.0 [12], в которой считывается адресуемая часть вышеназванного архива, выполняется анализ осцилляций давления в манжете и определяются гемодинамические параметры, включая:

- обычные результаты тонометрии: частоту сердечных сокращений F_{cc} , максимальное и минимальное значения артериального давления P_{max} и P_{min} ;

- показатели variability сердечного ритма: вариационный размах VR , модуль Mo , амплитуду моды AMo и показатель $pnn50$, определяющий долю кардиоинтервалов, отличающихся по длительности от предшествующего интервала, более чем на установленную величину;

- показатель KIT , определяющий продолжительность диастолической части кардиоинтервала по отношению к его общей длительности;

- скорость распространения пульсовой волны C_v и толщину интим-медиа сосудов TIM ;

- параметры, найденные исходя из опубликованных в [6] статистических зависимостей, а именно, вязкость крови η , содержание гемоглобина Hb и объем сердечного выброса V_{sys} .

Важное диагностическое расширение классической тонометрии, обеспечиваемое в данной разработке, заключается в построении профиля давлений выделенного кардиоинтервала при заданном значении давления в манжете. Кроме того, авторы дополнили приведенный в работе [1] альбом контрольных нормотонических и гипертонических кардиопрофилей профилями, типичными для ряда заболеваний (диабет, атеросклероз, аортальный стеноз, аортальная регургитация, сердечная недостаточность), оказывающих существенное влияние на гемодинамику. Это позволяет автоматизировать этап сопоставления кардиопрофиля обследуемого с контрольными профилями для различных кардиопатологий и функциональных отклонений, выполняемый в настоящее время непосредственно врачом с той или иной степенью субъективности.

Так как уровень амплитуды осцилляций зависит от систолического давления, при сопоставлении кардиопрофиля пациента с контрольным кардиопрофилем в ПАК «СПАС» выполняется масштабирование последнего и вычисляется интеграл площади отклонения. Необходимо отметить, что профили кардиоинтервалов при давлении в манжете, существенно меньшем P_{max} , оказываются малоинформативными, так

как публикуемые контрольные профили кардиоинтервалов соответствуют давлению P_{max} .

Объединение ПАК «СПАС» с программным модулем «БИОДИС» [13], реализованное в комплексе «БИОСПАС», обеспечивает дополнительные возможности, включая расширение диагностического списка с 3 до 9 независимых гемодинамических показателей. В этом случае в программу «БИОДИС» из программы «СПАС» передаются следующие данные (рисунок 2): частота сердечных сокращений F_{cc} , диастолическое P_{min} и систолическое давление P_{max} , скорость пульсовой волны C_v , показатель KIT и содержание гемоглобина Hb .

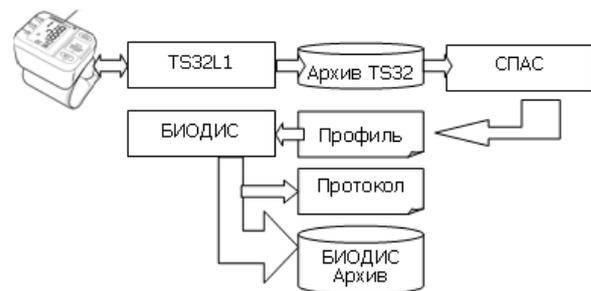


Рисунок 2 – Передача данных в программно-аппаратном средстве «БИОСПАС» с дополнительным подключением программы «БИОДИС»

К числу информативных параметров, определяемых в программе «БИОДИС», относятся коэффициент деформации сосудов и модуль упругости ткани стенок сосудов, влияющие на скорость пульсовой волны. Для проверки расчетных значений указанных параметров в программе «СПАС» вычисляется толщина стенок артерий, которая может быть определена методом ангиографии и другими экспериментальными методами. При отсутствии взаимодействия программ «СПАС» и «БИОДИС» последняя программа имеет интерфейс замещения импортируемых данных в ручном режиме (в настоящее время встроенный архив «БИОДИС» содержит результаты более 2000 расчетов).

В соответствии с [11] алгоритм программы «БИОДИС» формализует решение следующей задачи нелинейного программирования: найти $Y \equiv \{V_m, pH, Hb, k_\eta, E_v, k_{sv}, k_d, P_{max}, P_{min}\}$ в области их допустимых значений по входным данным $X \equiv \{A, H, M, L, F_{cc}, P_{max}^0, P_{min}^0\}$ с критерием точности по значениям артериального давления $|P_{max} - P_{max}^0| + |P_{min} - P_{min}^0| \leq \Delta_p$. При минимизации невязок значений искомым параметров и их норм

Средства измерений

используются адаптационные параметры $K_{opt} \equiv \{\Delta_P, m_{Hb}, m_{pH}, m_{\eta}, m_{str}, m_{sys}, m_E, S_{pH}, S_{Hb}, S_E, S_{str}, S_{\eta}, S_d\}$

весовых коэффициентов m_{xx} , пределов изменения искомых параметров S_{xx} и гемодинамические нормы:

$$Norma \equiv \left\{ \begin{array}{l} V_{sys}^0 = 70 \text{ мл}, pH_0 = 7,37, Hb_0 = 150 \text{ г/л}, \\ \eta_0 = 5 \text{ сСт}, E_0 = 12 \cdot 10^5 \text{ МПа} \end{array} \right\}.$$

Упомянутые адаптационные параметры уточнялись путем верификации модели по результатам 4000 расчетов.

Приведем характеристики программно-аппаратного средства «СПАС» в предлагаемом комбинированном варианте:

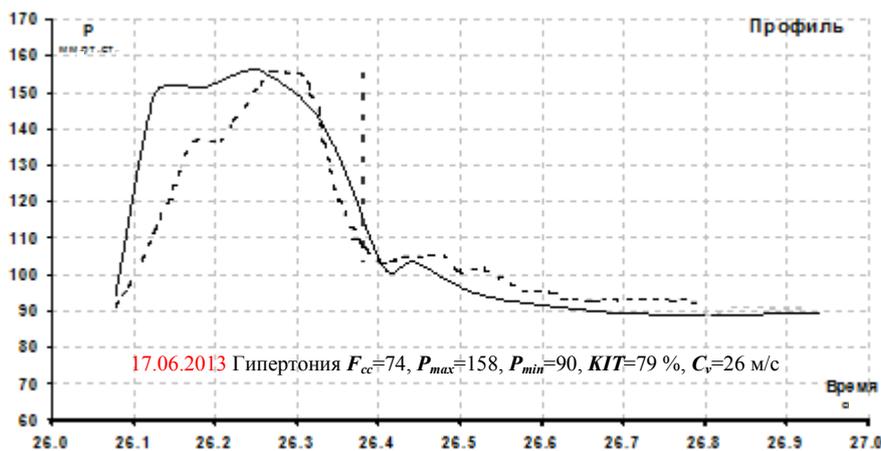
- число точек каждого профиля кардиоинтервала – 30...60;
- средняя скорость снижения давления в тонометре – 3 мм рт. ст./с;

– отклонение значений давлений серийного тонометра LD-1 и давлений, определенных в «СПАС», не более чем на 5 мм рт. ст., что составляет 3–7 % и соответствует тонометрической точности измерений [3].

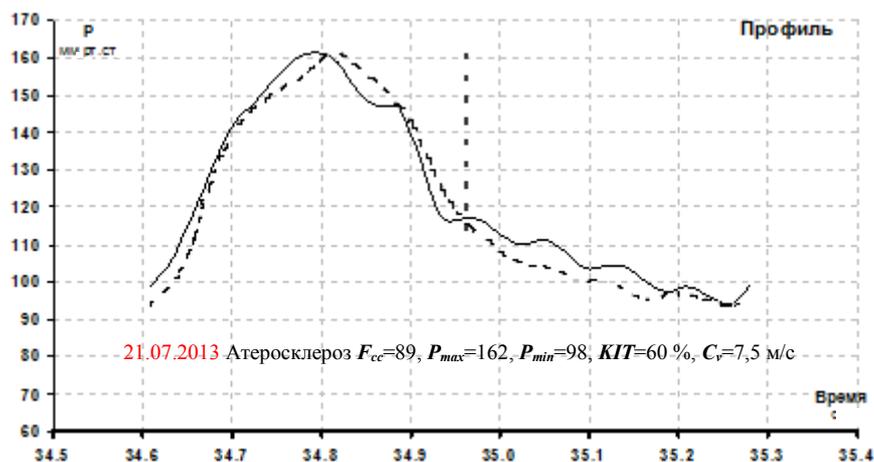
Так как в микроконтроллере тонометра и в программе «СПАС» производится обработка данных, получаемых с одного датчика давления, различия в результатах объясняются применением различных алгоритмов обработки данных и анализа.

Апробация программно-аппаратного комплекса «БИОСПАС»

Пример 1. На рисунке 3 приведены выборочные данные о гемодинамическом состоянии пациента с диагнозом «гипертония» в возрасте 65 лет в различные моменты амбулаторного лечения в Гомельской областной поликлинике под контролем кардиолога.



а



б

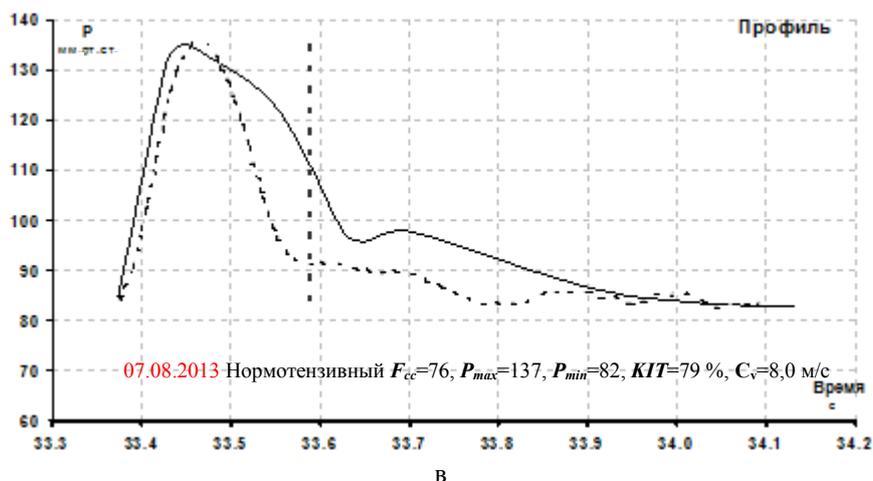


Рисунок 3 – Гемодинамические профили пациента (сплошные линии) в сравнении с профилями, типичными для гипертонии (а), атеросклероза (б) и возрастного нормотензивного состояния (в), показанными пунктирными линиями

Пример 2 относится к регулярному мониторингу состояния сердечно-сосудистой системы студентов БелГУТа в специально подобранных группах. Группа К1 состояла из 18 юношей 19–22 лет, признанных здоровыми и прошедших тщательное медицинское обследование, включавшее ЭКГ, УЗИ сердца и тестирование с дозированными нагрузками. Группа

К2 состояла из 18 юношей и девушек 18–20 лет, имевших особенности функционирования сердечно-сосудистой системы, но занимавшихся в группах общей физической подготовки. Помимо расширенной осциллометрии в состоянии покоя и расчета параметров гемодинамики, процедуры мониторинга включали функциональные пробы (нагрузочные тесты).

Таблица 1

Результаты нагрузочного тестирования группы студентов К1

Параметр	Значение		
	В покое	Сразу после нагрузки	После 3 мин восстановления
F_{cc}	64	83	67
P_{max}	122	141	123
P_{min}	73	80	71
KIT	73 %	67 %	74 %
$pnn50$	31 %	42 %	28 %
C_v	6,9	7,6	7,2
η	4,0	2,5	3,9
Hb	135	133	133
V_{sys}	0,075	0,136	0,069
TIM	0,65	0,70	0,68
E_c	0,067	0,171	0,065
k_d	100 %	100 %	100 %
E	15	18	16
R_p	48	38	45
pH	7,29	7,20	7,29
k_{str}	99 %	65 %	97 %
AV_{O_2}	37 %	52 %	37 %
F_o	71 %	77 %	69 %
D_{sys}	29	32	28

В результате анализа состояния сердечно-сосудистой системы обследуемых из группы К1 можно заметить, что профили кардиоинтервалов в основном соответствуют нормотензии молодого человека.

Значения параметров гемодинамики индивидуальны, но все они попадают в диапазон референсных значений для рассматриваемой возрастной группы. Полученные значения (таблица 1) были сопоставлены с литературными данными. В результате была получена зависимость скорости распространения пульсовой волны (СРПВ) от среднего артериального давления $СРПВ = 2,31 + 0,0473 \cdot P_{ср}$, соответствующая табличным нормам для взрослых моложе 30 лет.

Характеристики гемодинамики студентов группы К2 в 45 % случаев содержали одно или более отклонений от нормы (таблица 2) и этим студентам было рекомендовано углубленное обследование.

Пример 3. Использование комплекса «БИОСПАС» в практике спортивных тренировок

по данным 4 измерений (покой, 30 приседаний за 30 с, восстановление через 3 и 5 мин) показано в таблице 3 на примере диагностики баскетболиста 1-го разряда, 1995 г. р., имеющего рост 195 см и массу тела 80 кг.

В результате проведенного исследования гемодинамики физкультурников и спортсменов можно заметить, что профили кардиоинтервалов в группе тестируемых в основном относятся к нормотензии. Изменения параметров гемодинамики индивидуальны, но имеют общие тенденции:

- функциональная нагрузка приводит к снижению индексов *KIT*, *pnn50*, вязкости крови и содержания гемоглобина;

- увеличение частоты сердечных сокращений при физической нагрузке происходит за счет уменьшения диастолического периода;

- кардио профили части обследуемых в период нагрузки оказались близки к контрольным профилям, соответствующим сердечной и аортальной недостаточности, а также атеросклерозу сосудов.

Таблица 2

Кардио профили студентов группы К2 с особенностями гемодинамики

	Тип кардио профиля		
	В покое	Сразу после нагрузки	После 3 минут восстановления
В-в Н.П.	<i>HF</i>	<i>ASC</i>	<i>NORMj</i>
Б-й С.М.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
В-а А.Н.	<i>HF</i>	<i>DP</i>	<i>NORMj</i>
Г-о В.Н.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>
Д-н В.И.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
К-в С.В.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>
К-м С.О.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
М-а О.М.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>NORMe</i>

Примечание: *ASC* – атеросклероз, *HF* – сердечная недостаточность, *DP* – двойной пульс.

Таблица 3

Результаты диагностики гемодинамических показателей спортсмена-баскетболиста

Баскетбол-1 1995/184/80	F_{cc} уд/с	P_{max} мм рт.ст.	P_{min}	<i>KIT</i> %	<i>pnn50</i> %	C_v м/с	<i>Hb</i> г/л	η сСт
Покой	88	125	80	74	2	7,1	150	4,2
30 приседаний / 30 с	133	159	62	62	2	24,7	110	3,5
Восстановление 3 мин	118	154	56	59	0	12,4	126	3,7
Восстановление 5 мин	119	128	51	58	2	20,1	105	3,4

Заключение

1. Предложена новая техническая реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы в виде программно-аппаратного комплекса «БИОСПАС», основанная на объединении методов осциллометрии и классической тонометрии.

2. Применение ПАК «БИОСПАС» позволяет реализовать процедуру диагностики в режиме реального времени, расширить диагностический список с 3 до 9 независимых гемодинамических показателей, получить информативные графические зависимости в виде кардиопрофилей и автоматизировать процедуру их сопоставления с контрольными формами, характерными для нормального и патологических состояний сердечно-сосудистой системы.

3. Тестирование программы обработки осциллометрических данных ПАК «БИОСПАС» показало, что значения артериальных давлений P_{max}/P_{min} отличаются от аналогичных показателей сертифицированного тонометра на величину, сопоставимую с погрешностью тонометра (3–7 %).

4. Целесообразна разработка миниатюрных и мобильных аппаратных решений диагностического комплекса для автономной работы в режиме мониторинга.

Список использованных источников

1. Skinner, S.L. SphygmoCor Clinical Guide. At the Heart of Cardiovascular Management / S.L. Skinner. – Australia [Электронный ресурс]. – 2001. – Р. 78. Режим доступа: www.artcormedical.com. – Дата доступа: 02.02.2013.
2. Дегтярев, В.А. Возможности комплексного исследования системы кровообращения у населения методом объемной компрессионной осциллометрии / В.А. Дегтярев // Российские медицинские вести. – 2003. – № 4. – С. 18–28.
3. Иванов, С.Ю. Точность измерения артериального давления по тонам Короткова в сравнении с осциллометрическим методом / С.Ю. Иванов, Н.И. Лившиц // Вестник аритмологии. – 2005. – № 40. – С. 55–58.
4. Цупко, И.В. Способ определения артериального давления, параметров гемодинамики и состояния сосудистой стенки с использованием осциллометрии высокого разрешения / И.В. Цупко // Патент RU 2360596. – 2006. – С. 1–12.
5. Парашин, В.Б. Техничко-метрологические аспекты измерения артериального давления осциллометрическим методом / В.Б. Парашин, М.Н. Симоненко // Медицинская техника. – 2010. – № 1. – С. 22–26.
6. Babbs, C.F. Oscillometric Measurement of Systolic and Diastolic Blood Pressures Validated in a Physiologic Mathematical Model / C.F. Babbs // BioMedical Engineering OnLine. – 2012. – <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56>.
7. Gallagher, A.J. Blood Gas, Oxygen Saturation, pH, and Lactate Values in Elasmobranch Blood Measured with a Commercially Available Portable Clinical Analyzer and Standard Laboratory Instruments / A.J. Gallagher // J. of Aquatic Animal Health. – 2010. – Vol. 22. – P. 229–234.
8. Парфенов, А.С. Ранняя диагностика сердечно-сосудистых заболеваний с использованием аппаратно-программного комплекса «Ангиоскан-01» / А.С. Парфенов // Поликлиника. – 2012. – № 2/1. – С. 70–74.
9. Шилько, С.В. Программно-аппаратный комплекс для мониторинга сердечно-сосудистой системы на основе тонометрии / С.В. Шилько, В.В. Шевцов // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2(3). – С. 53–60.
10. Шевцов, В.В. Аппаратная реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы по данным осциллометрии / В.В. Шевцов, С.В. Шилько, М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 2(5). – С. 51–55.
11. Шилько С.В. Математическая модель и программная реализация мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3. – С. 104–112.
12. Свидетельство № 456 от 21.11.2012 о регистрации программного продукта СПАС V1.0 для биомеханической диагностики и мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, В.В. Шевцов // Заявка № С201210072 от 27.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтэл. уласнасці. – 2012.
13. Свидетельство № 455 от 21.11.2012 о регистрации компьютерной программы БИОДИС V2.5 / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько // Заявка С20120073 от 23.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2012.

APPARATUS REALIZATION AND APPROVAL OF NON-INVASIVE DIAGNOSTICS OF HEMODYNAMICS BASED ON TENSOMETRY AND EXTENDED TONOMETRY

Shil'ko S.V.¹, Kuzminsky Yu.G.¹, Borisenko M.V.²

¹V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the National Academy of Science of Belarus,
Gomel, Belarus

²Byelorussian State University of Transport, Gomel, Belarus
e-mail: shilko_mpri@mail.ru

Abstract. The results of development of special program and apparatus unit «SPAS» for biomechanical diagnostics of cardiovascular system by oscillometry method have been presented. The estimation of possibilities of apparatus realization based on tensometric station TS-32 is been given.

Keywords: diagnostics, hemodynamics, oscillometry, tensometry, tonometer.

References

1. Skinner S.L. SphygmoCor Clinical Guide. [At the Heart of Cardiovascular Management], 2001, p. 78: Available at: www.artcormedical.com: accessed 02.02.2013.
2. Degtyarev V.A. [Possibility of a comprehensive study of the circulatory system of the population by volumetric compression oscillometry]. *Rossijskie meditsinskie vesti*, 2003, no. 4, pp. 18–28 (in Russian).
3. Ivanov S.Yu., Livshits N.I. [The accuracy of blood pressure measurement on Korotkov's tones compared with oscillometric method]. *Vestnik aritmologii*, 2005, no. 40, pp. 55–58 (in Russian).
4. Tsupko I.V. *Sposob opredeleniya arterial'nogo davleniya, parametrov gemodinamiki i sostoyaniya sosudistoj stenki s ispol'zovaniem ostsilometrii vysokogo razresheniya* [A method for determination of blood pressure, hemodynamic parameters and the condition of the vascular wall using high resolution oscillometry]. Patent RF, no. 2360596, 2006.
5. Parashin V.B., Simonenko M.N. [Technical and metrological aspects of blood pressure measurement by the oscillometric method]. *Meditsinskaya tekhnika*, 2010, no. 1, pp. 22–26 (in Russian).
6. Babbs C.F. Oscillometric Measurement of Systolic and Diastolic Blood Pressures Validated in a Physiologic Mathematical Model. *BioMedical Engineering OnLine*. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56> (accessed 23.09.2014).
7. Gallagher A.J. Blood Gas, Oxygen Saturation, pH, and Lactate Values in Elasmobranch Blood Measured with a Commercially Available Portable Clinical Analyzer and Standard Laboratory Instruments // *J. of Aquatic Animal Health*, 2010, vol. 22, pp. 229–234.
8. Parfenov A.S. [Early diagnosis of cardiovascular disease with the use of hardware-software complex «Angioscan-01»]. *Poliklinika*, 2012, no. 2/1, pp. 70–74 (in Russian).
9. Shil'ko S.V., Shevtsov V.V. [Hardware and software system for monitoring the cardiovascular system based on tonometry]. *Pribory i metody izmerenij*, 2012, no. 2(3), pp. 53–60 (in Russian).
10. Shevtsov V.V., Shil'ko S.V., Borisenko M.B., Kuzminsky Yu.G. [Hardware implementation of biomechanical diagnosis of cardiovascular system according to the oscillometry]. *Pribory i metody izmerenij*, 2012, no. 2(5), pp. 51–55 (in Russian).
11. Shil'ko S.V., Kuzminsky Yu.G., Borisenko M.B. [Mathematical model and program realization of heart and vessel system monitoring]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*, 2011, no. 3, pp. 104–112 (in Russian).
12. Shil'ko S.V., Kuzminsky Yu.G., Shevtsov V.V. *Svidetel'stvo o registratsii programmnogo produkta SPAS V1.0 dlia biomekhanicheskoy diagnostiki i monitoringa serdechno-sosudistoj sistemy* [Certificate on the registration software SPAS V1.0 for biomechanical diagnosis and monitoring of cardiovascular system]. Certificate RB, no. 456, 2012.
13. Kuzminsky Yu.G., Shil'ko S.V. *Svidetel'stvo o registratsii komp'yuternoj programmy BIODIS V2.5* [Certificate of registration of a computer program BIODIS V2.5]. Certificate RB, no. 455, 2012.

Поступила в редакцию 11.02.2014.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ

УДК 620.179.118.7 : 621.822.6

ЭЛЕКТРОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Подмастерьев К.В., Подмастерьев А.К.

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс
г. Орел, Российская Федерация
e-mail: asms-orel@mail.ru

Обоснована возможность мониторинга процессов приработки подшипников качения с использованием электрорезистивного метода контроля. Описана сущность метода, проанализированы его особенности, обеспечивающие возможность получения объективной информации о состоянии объекта при его приработке. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности различных диагностических параметров, подтверждающие возможность реализации объективного контроля приработки подшипников электрорезистивным методом.

Ключевые слова: электрорезистивный контроль, приработка, подшипник качения.

Введение

Подшипники качения являются наиболее распространенными узлами механических систем, обеспечивающими точное расположение и взаимное перемещение отдельных деталей в широком диапазоне скоростей и нагрузок. При этом отказ подшипника нередко приводит к аварийным отказам сложных и ответственных изделий с риском для жизни обслуживающего персонала и большими экономическими потерями. В этой связи достижение требуемых эксплуатационных характеристик установленного в изделии подшипника является необходимым условием обеспечения качества машин и механизмов.

Фактическое состояние подшипника в изделии определяется большим числом различных факторов, при этом существенное влияние на это состояние оказывает начальный период эксплуатации – период приработки. При приработке происходят сложные процессы, приводящие к изменению шероховатости и физико-

химических свойств рабочих поверхностей деталей, к перераспределению по поверхностям смазочного материала и изменению его свойств, что проявляется в смятии наиболее высоких неровностей, изменении динамики образования гидродинамических и граничных смазочных слоев, эффективно разделяющих контактирующие поверхности и препятствующие их износу. Таким образом, процесс приработки во многом формирует будущую работоспособность подшипника и, соответственно, всего узла и изделия в целом.

Приработку стремятся завершить до ввода изделия в эксплуатацию, выполняя операции технологической обкатки, прикатки, тренировки и др. Их проводят обычно многоступенчато при последовательном изменении режимов, в частности частоты вращения и (или) нагрузки. При этом изменение режима работы объекта целесообразно осуществлять при стабилизации состояния объекта на предыдущем режиме. Для управления указанными операциями и обеспечения их эффективности необхо-

дим мониторинг фактического состояния объекта в процессе его приработки, а для этого необходимы методы, обеспечивающие получение достоверной информации о процессах, происходящих в подшипнике при приработке.

Анализ состояния вопроса показал, что в настоящее время для этой цели используются, прежде всего, тепловые методы, основанные на оценке температуры подшипников, в отдельных случаях применяют механические (по моменту трения в опоре) и вибрационные методы, а иногда одновременно несколько методов [1–3]. Однако в первом случае методы являются очень инерционными, при этом измеряют обычно не температуру в зонах трения подшипника, до которых добраться не просто, а температуру наружного кольца или даже корпуса узла. Методы второй группы имеют невысокую чувствительность к изменению состояния подшипника при приработке. Поиску более эффективного метода контроля процесса приработки в подшипниках, лишённого указанных недостатков и способного заменить или дополнить существующие методы, посвящена настоящая работа.

Обоснование физического принципа и описание сущности метода контроля

Известно большое количество различных методов контроля технического состояния трибосопряжений, в частности, подшипников качения, основанных на различных физических принципах, и все эти методы интенсивно разрабатываются [4] (на рисунке 1 в качестве иллюстрации приведены результаты патентного поиска по проблеме). Это обусловлено тем, что, несмотря на кажущуюся простоту, подшипник качения как объект диагностирования является довольно сложной системой, содержащей большое число деталей, совершающих сложные относительные перемещения при взаимодействии друг с другом. Поэтому каждый из методов, характеризуя лишь отдельные стороны этих взаимодействий, в большей или меньшей степени обеспечивает решение частных задач диагностирования и принципиально не может дать исчерпывающей информации о состоянии подшипника. В этой связи различными научными коллективами проводятся исследования по поиску новых принципов выделения информации о состоянии подшипника и поиску наиболее рациональных методов или комбина-

ции методов решения тех или иных задач диагностирования и контроля.

Из представленных на рисунке 1а данных видно, что в качестве наиболее интенсивно развивающихся методов наряду с тепловыми, механическими и вибрационными можно выделить электрические методы, основанные на оценке состояния работающего подшипника по характеристикам изменяющихся электрических параметров объекта или электрических сигналов, генерируемых объектом. При этом среди электрических методов наиболее интенсивно развивающимися являются электрорезистивные методы, основанные на использовании в качестве диагностических параметров различных статистических оценок электрического сопротивления, проводимости или параметров микроконтактирования (рисунок 1б). На наш взгляд именно эти методы могут стать наиболее эффективными для оценки состояния подшипника при его приработке.

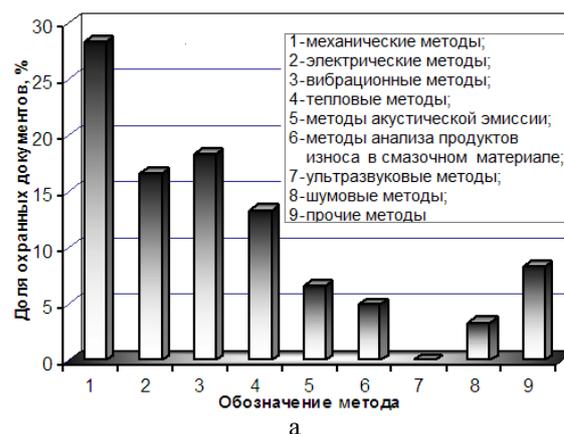


Рисунок 1 – Доля защищенных патентами технических решений в период с 2000 по 2013 г. по различным методам трибомониторинга (а) и по электрическим методам, реализующим различные диагностические параметры (б)

Сущность электрорезистивных методов заключается в следующем. При работе подшипника между телами качения и кольцами формируется устойчивая смазочная пленка, на рабочих поверхностях образуются окисные пленки, а также граничные смазочные пленки, в том числе и хемосорбированные. Смазочный материал, как правило, обладает высоким удельным электрическим сопротивлением, поэтому при изменении толщины смазочной пленки и при ее разрушении в контактах наиболее высоких микронеровностей (при микроконтактировании), при изменении свойств и разрушении поверхностных пленок существенно изменяется электрическое сопротивление зоны трения. Электронная измерительная аппаратура, подключаемая к кольцам контролируемого подшипника, анализирует интегральное сопротивление подшипника в целом, определяемое сопротивлениями зон трения каждого из тел качения с каждым из колец согласно эквивалентной электрической схеме замещения, представленной в работах [4, 5].

Эти методы обладают рядом неоспоримых преимуществ, что и обуславливает их выбор как приоритетных. К числу достоинств относятся: универсальность (возможность решения задач контроля и диагностики отдельных элементов узла или узла в целом); безынерционность по отношению к процессу трения; простота реализации (не требуются специальные преобразователи, электронное средство диагностирования подключается непосредственно к деталям контролируемого узла или корпусу и валу узла); простота формирования и обработки сигналов измерительной информации (электрический сигнал о состоянии объекта контроля поступает непосредственно из зон трения, легко преобразуется, оценивается и обрабатывается с помощью типовых электронных цепей, универсальных электроизмерительных приборов и систем).

Предпосылки применения электрорезистивных методов трибомониторинга и контроля заложены в работах [6–8]. Методы получили дальнейшее интенсивное развитие, при этом их теоретическое обоснование наиболее полно представлено в работах [4, 5, 9, 10]. Следует отметить, что на сегодняшний день разработан целый комплекс методов и реализующих их средств, обеспечивающих успешное решение различных научно-производственных задач, среди которых: входной кон-

троль новых подшипников качения при изготовлении и ремонте машин и механизмов с целью выявления подшипников, обладающих потенциально низкой надежностью при использовании в конкретном объекте; контроль качества сборки машин и механизмов с выявлением вида и оценки значения реальных макроотклонений рабочих поверхностей деталей (овальность, огранка); функциональная диагностика состояния подшипников при эксплуатации ответственных изделий с целью предотвращения аварийных отказов; дефектация бывших в эксплуатации подшипников при ремонте машин и механизмов с усредненной комплексной оценкой степени износа и поиском локальных дефектов; оценка вида смазки и эффективности системы минимального смазывания; контроль качества смазочных материалов [4, 5, 11–16].

С учетом указанных выше преимуществ электрорезистивного метода на основе теоретического анализа процессов в зонах трения работающего подшипника нами выдвинуто предположение о возможности решения с помощью данного метода поставленной выше задачи эффективного контроля процесса приработки подшипников. Оно базируется на теоретическом анализе ранее разработанных математических моделей электрического сопротивления зон трения деталей подшипника [6, 9] с выявлением и сравнением факторов, определяющих характер взаимодействия контактирующих поверхностей деталей работающего подшипника и значение электрического сопротивления зоны трения, с одной стороны, и факторов, изменяющихся при приработке подшипника, с другой стороны. В пользу этого предположения свидетельствуют и имеющиеся в литературе отдельные сведения об использовании данных методов.

Ниже приведены факторы, влияющие на электрическое сопротивление зон трения и подшипника в целом, при этом курсивом выделены факторы, изменяющиеся при приработке:

- номинальная макрогеометрия (радиусы кривизны рабочих поверхностей);
- отклонения от номинальной макрогеометрии (овальность, огранка различных порядков), наличие локальных дефектов;
- *шероховатость рабочих поверхностей деталей подшипника*;
- упругие свойства материалов деталей подшипника (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), *свойства поверхностных слоев*;

– реологические свойства (вязкость, пьезокоэффициент вязкости) и количество смазочного материала;

– реальные режимы и условия работы подшипника в изделии (характер и значение воспринимаемой нагрузки, направление и частота вращения колец, температура зоны трения и среды и т.п.).

Анализ факторов указывает, что изменение состояния подшипника в процессе его приработки за счет изменения выделенных курсивом факторов должно приводить к адекватному и однозначному изменению электрического сопротивления.

Результаты экспериментальных исследований

С целью подтверждения выдвинутого предположения, исследования эффективности различных электрорезистивных диагностических параметров и их чувствительности к изменению состояния подшипника при его приработке в настоящее время проводятся комплексные экспериментальные исследования, некоторые предварительные результаты которых приведены ниже.

Для проведения экспериментов разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2.

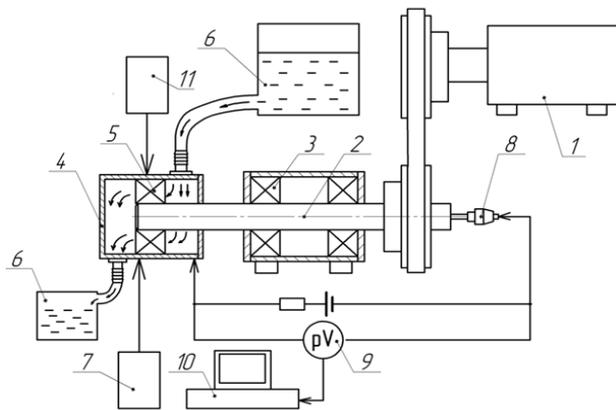


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки:
1 – регулируемый привод; 2 – вал; 3 – шпиндельный узел; 4 – масляная камера; 5 – контролируемый подшипник; 6 – система смазывания; 7 – устройство радиальной нагрузки; 8 – электрический соединитель; 9 – плата сбора данных (осциллограф); 10 – компьютер; 11 – виброанализатор

Установка обеспечивает возможность исследования радиальных подшипников различных типоразмеров при вращении внутреннего

кольца подшипника с заданной частотой, заданном радиальном нагружении, использовании жидкого или пластичного смазочного материала, при этом система смазывания, включающая масляную камеру, обеспечивает возможность изменения объема масла и системы его подачи. Регулируемый привод 1 с тахометром передает вращение валу 2 шпиндельного узла 3. На валу 2 крепится внутреннее кольцо контролируемого подшипника 5, установленного в герметичной масляной камере 4. При помощи системы смазывания 6 в камеру 4, подается смазочный материал (масло). Набором грузов 7 создается радиальная нагрузка на подшипник. Испытуемый подшипник подключается последовательно в электрическую цепь с источником постоянного тока при помощи электрического соединителя 8 (ртутный токосъемник – соединитель *Mercotac* 110.). Таким образом, в электрической цепи подшипник выступает в роли плеча резистивного делителя, напряжение с которого снимается при помощи электронной измерительной аппаратуры 9 (плата сбора данных *Ni 6008* или осциллограф *Hantek DSO-2090*) и обрабатывается персональным компьютером 10. Предусмотрена возможность определения в качестве дополнительных диагностических параметров параметров вибрации, измеряемых виброанализатором 11 (СД-21).

Сущность проведенных экспериментальных исследований заключалась в следующем. Новые подшипники одной партии после промывки и просушки смазывались определенным количеством смазочного материала заданного состава, после чего устанавливались на стенд. Включался привод и производился мониторинг состояния подшипника по его электрическому сопротивлению в процессе приработки подшипника, работающего с заданной частотой вращения при нагружении заданной радиальной нагрузкой. Значения электрического сопротивления регистрировались с заданной частотой дискретизации. После регистрации электрического сопротивления осуществлялась статистическая обработка полученных реализаций с вычислением среднего значения, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариаций, интегральной и дифференциальной функций распределения сопротивления, спектральных характеристик за заданные интервалы времени.

На рисунке 3 представлены характерные зависимости (фрагменты временной реализа-

ции сопротивления за 1 с и гистограммы распределения сопротивления), полученные для одного из подшипников 1000900 в различные периоды его приработки (до приработки, через 20 мин после начала приработки и после часовой приработки) при радиальной нагрузке 100 Н, частоте вращения 1200 об/мин, при использовании масла индустриального И-20 в количестве 0,1 мл.

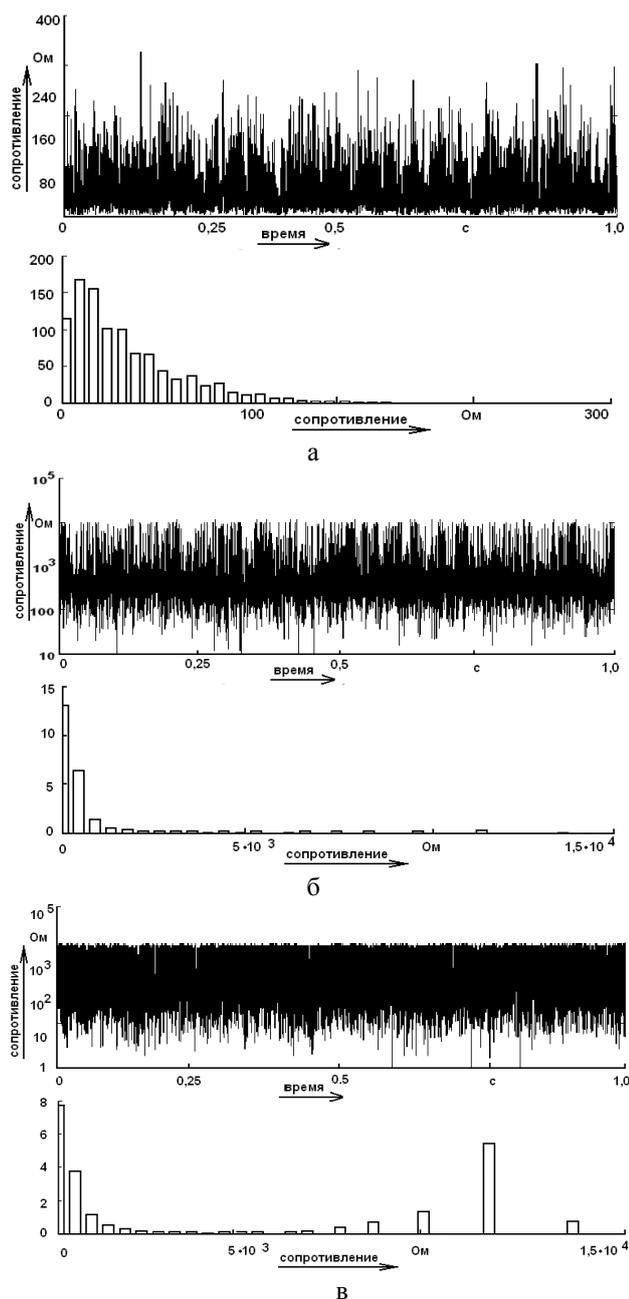


Рисунок 3 – Примеры реализаций функции сопротивления и гистограмм распределения сопротивления для подшипника 1000900 до приработки (а), после приработки в 20 мин (б) и после часовой приработки (в)

Регистрация проводилась с частотой дискретизации – 10 кГц

Анализ проведенных исследований показывает следующее:

1. В зависимости от состояния подшипника в нем может наблюдаться различный режим смазки – от практически жидкостного, когда поверхности трения разделяются слоем смазочного материала, до граничного, когда трение осуществляется по поверхностным слоям. При этом электрическое сопротивление изменяется с высокой частотой случайным образом в очень широких пределах – от единиц ом при микроконтактировании до сотен килоом и даже мегаом при восстановлении масляной пленки.

2. Процесс приработки сопровождается существенным изменением состояния подшипника в зоне трения, что однозначно фиксируется по изменению функции электрического сопротивления подшипника. До приработки сопротивление подшипника составляет несколько десятков ом с редкими короткими импульсами, не превышающими 200–250 Ом. При этом гистограмма распределения вероятности сопротивления свидетельствует о практически граничной смазке в подшипнике с наиболее вероятными значениями сопротивления 20–30 Ом. Через 20 мин после начала приработки характер изменения сопротивления трансформируется – его уровень повысился до тысяч ом с отдельными импульсами до 10 кОм и выше. Это свидетельствует, очевидно, о переходе к полужидкостной (смешанной) смазке. После часовой приработки состояние подшипника еще в большей степени улучшилось – значение сопротивления возросло еще в большей степени с редкими падениями до сотен ом. При этом закон распределения сопротивления становится практически бимодальным, что свидетельствует о смешанной смазке в подшипнике, когда частично осуществляется жидкостная смазка, а частично граничная.

Выявленный характер изменения функции сопротивления подшипника в зависимости от времени его приработки свидетельствует об улучшении состояния подшипника, что может быть вызвано, с одной стороны, улучшением условий формирования гидродинамической смазочной пленки в зонах трения вследствие равномерного распределения смазочного материала по рабочим поверхностям и удаления лишнего материала из этих зон, с другой стороны – изменением свойств поверхностных слоев и пара-

метров шероховатости рабочих поверхностей, смятием наиболее высоких микронеровностей. В обоих случаях полученный результат соответствует реальным триботехническим процессам в подшипнике при его приработке.

С целью выявления наиболее информативных характеристик флуктуирующего сопротивления, несущих информацию о процессе приработки, получены и проанализированы статистические характеристики функции сопротивления. На рисунке 4 представлены зависимости среднего значения сопротивления (R_{cp}), среднего квадратического отклонения сопротивления (СКО) и коэффициента вариаций ($СКО/R_{cp}$) от времени приработки, полученные для трех однотипных подшипников из одной партии при одинаковых режимах.

Видно, что несмотря на специфику зависимостей для каждого из подшипников характер изменения R_{cp} во времени (рисунок 4а) у подшипников идентичен – при приработке подшипника среднее значение сопротивления возрастает по закону, близкому к экспоненциальному. При этом стабилизация среднего значения, очевидно, может свидетельствовать о завершении процесса приработки. Характер изменения СКО (рисунок 4б) в период приработки также идентичен для трех подшипников и аналогичен изменению среднего.

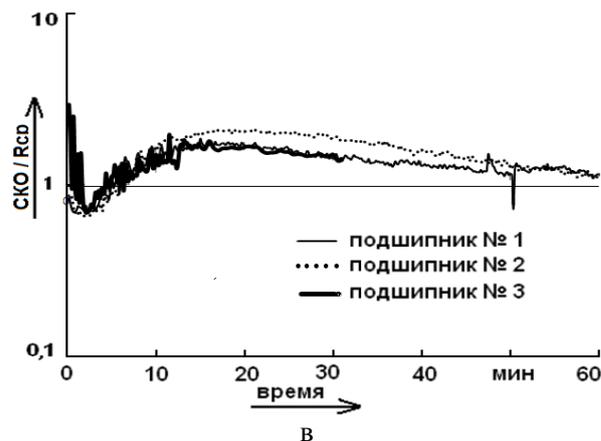
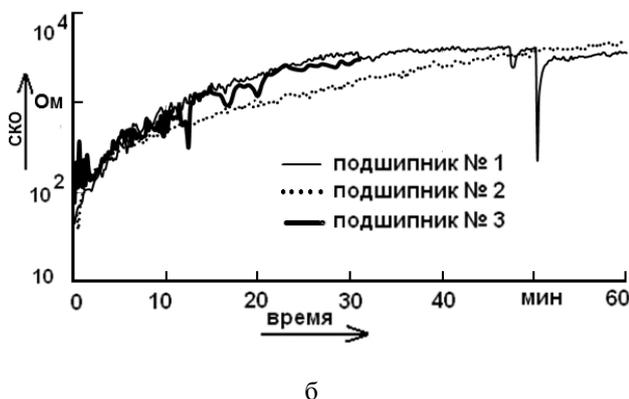
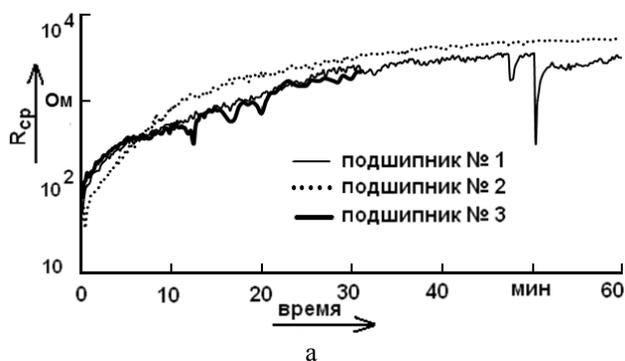


Рисунок 4 – Зависимости среднего значения сопротивления подшипника R_{cp} (а), среднего квадратического отклонения сопротивления СКО (б) и коэффициента вариаций $СКО/R_{cp}$ (в) для трех подшипников 1000900 в процессе их приработки

Будучи также идентичными для трех разных подшипников, функции изменения коэффициента вариаций во времени (рисунок 4в) имеют иной характер, свидетельствующий о том, что в процессе приработки степень нестабильности процессов в подшипнике снижается.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Электрическое сопротивление подшипника при его работе изменяется случайным образом (флуктуирует) с высокой частотой в широком диапазоне – от единиц ома при граничной смазке и микроконтактировании до сотен и тысяч килоом при формировании гидродинамической смазочной пленки в зонах трения.

2. В процессе приработки подшипника характер флуктуаций его электрического сопротивления однозначно изменяется, что характеризуется монотонным возрастанием среднего значения сопротивления (практически на два порядка) с последующей его стабилизацией и снижением коэффициента вариаций. Данные изменения свидетельствует об улучшении состояния рабочих поверхностей деталей и условий смазывания в зонах трения работающего подшипника и полностью соответствует реальным триботехническим процессам в подшипнике при его приработке.

3. Электрическое сопротивление подшипника и его статистические параметры – среднее значение, среднее квадратическое отклонение и

коэффициент вариаций, объективно и с высокой чувствительностью характеризуют фактическое состояние подшипника и могут использоваться в качестве диагностических при мониторинге процесса приработки.

4. Полученные результаты подтверждают возможность реализации контроля процесса приработки подшипников электрорезистивным методом и свидетельствуют о целесообразности продолжения экспериментальных исследований в направлении изучения связи различных статистических и спектральных оценок электрического сопротивления с параметрами шероховатости рабочих поверхностей деталей подшипника в процессе его приработки с целью формирования наиболее информативных диагностических параметров.

Исследования проведены с использованием измерительного оборудования Центра коллективного пользования контрольно-измерительным и испытательным оборудованием при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет–УНПК».

Список использованных источников

1. Патент SU 1663256 Способ приработки радиальноупорных подшипников в дуплексе / И.А. Булавин, А.В. Смолюгов, А.Ю. Груздев, Н.В. Агеев, Н.Е. Паршин, В.П. Адаричев, В.В. Гришин. – Оpubл. 15.07.91. Бюл. № 26.
2. Пыльнова, А.В. Контроль подшипников качения на выбеге в процессе ультразвуковой приработки / А.В. Пыльнова, О.М. Батищева // Надежность и качество. Труды международного симпозиума. – 2010. – Т.2. – С. 124-125.
3. Шуваев, В.Г. Вибрационная диагностика и контроль приработки подшипников качения на основе разделения вибрационных сигналов / В.Г. Шуваев, А.В. Пыльнова // Надежность и качество. Труды международного симпозиума. – 2013. – Т.2. – С. 280-282.
4. Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий / М.И. Абашин [и др.]; под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева. – М.: Спектр, 2012. – 338 с.
5. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
6. Елин, Л.В. Электрическое сопротивление пленок смазочного масла «машинное-2» и трансформаторного / Л.В. Елин, Н.В. Захаржевская // Одесский институт инженеров морского флота: Научные труды. – Вып. 8. – М.: Морской транспорт, 1949. – С. 120–134.
7. А.с. 139128 СССР, G 01 I. Устройство для контроля за состоянием подшипников / Н.И. Коровин, А.И. Эйсуевич. – Оpubл. 30.03.61, Бюл. № 12.
8. Кеннел, Дж. Упругогидродинамическая смазка приборного шарикового подшипника / Дж. Кеннел, Д. Снидекер // Тр. амер. о-ва инж.-мех. Сер. Проблемы трения и смазки. – 1976. – № 2. – С. 57–63.
9. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск: Наука и техника, 1986. – 260 с.
10. Свириденко, А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике / А.И. Свириденко [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1987. – 257 с.
11. Подмастерьев, К.В. Исследование влияния макрорасположений дорожек качения колец на состояние смазки в подшипнике электрорезистивным методом / К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // Трение и износ. 2005. – Т. 26. – № 5. – С. 546-553.
12. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // Дефектоскопия. – 1998. – № 8. – С. 59–67.
13. Патент № 2124191 РФ, G 01 M13/04. Способ диагностирования тел качения подшипников и устройство для его осуществления / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин. – Оpubл. 27.12.98, Бюл. № 36.
14. Патент 2110053 РФ, G 01 M13/04. Способ диагностирования колец подшипников качения / К.В. Подмастерьев, С.Ф. Корндорф, Е.В. Пахолкин. – Оpubл. 27.04.98, Бюл. № 12.
15. Неразрушающий контроль / В.П. Вавилов [и др.], под общ. Ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – Т.5. Кн. 1. Тепловой контроль. Кн. 2. Электрический контроль (2-е издание, исправленное).
16. Пахолкин, Е.В. Приборы для трибомониторинга / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Датчики и системы. – 2008. – № 3. – С. 16-19.

**ELECTRO-RESISTANCE METHOD OF CHECK A PROCESS GRINDING
THE ROLLING BEARINGS**

Podmasteryev K.V., Podmasteryev A.K.

State Universite – Education-Science-Production Complex, Orel, Russia
e-mail: asms-orel@mail.ru

Abstract. Base a possibility of monitoring processes of grinding the rolling bearings with use electro-resistance method of check. Is write of essence this method, are analyses his peculiarities, which are provide objective information on the condition a object by his grinding. Are consider the results of experimental researches the effective different diagnostically parameters, which are confirm a possibility of realization objective check of grinding the rolling bearings with use electro-resistance method.

Keywords: electro-resistance check; grinding; rolling bearing.

References

1. Bulavin I.A., Smolyugov A.V., Gruzdev A.YU., Ageev N.V., Parshin N.E., Adarichev V.P., Grishin V.V. *Sposob prirabotki radialnoupornykh podshipnikov v duplekse*. [The way to breaking-in of angular contact bearings in duplex]. Patent SU, no. 1663256, 1991.
2. Pyilnova A.V., Batischeva O.M. [Control of rolling bearings freewheel during ultrasonic breaking-in]. *Nadiozhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. 2010, no 2, pp. 124–125 (in Russian).
3. Shyvaev V.G., Pyilnova A.V. [Vibration diagnostics and control of the breaking-in of rolling bearings based on the separation of vibrational signals]. *Nadiozhnost' i kachestvo. Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. 2013, no. 2, pp. 280–282. (in Russian).
4. Abashin M.I., Barzov A.A., Barinov C.V., Galinovskiy A.L., Ivanov V.P., Kirichek A.V., Lisichkin V.G., Markov V.V., Mishin V.V., Morozova, A.V., Paholkin E.V., Podmasteryev K.V., Solov'ev D.L., Tarasov D.E. Edited by A.V. Kirichek K.V. Podmasteryev. *Kontrol' i diagnostika pri obespechenii kachestva mashinostroitelnykh izdelij* [Control and diagnostics while providing quality engineering products. Kollektive]. Moscow, Izdatelskiy dom Spektr Publ., 2012. 338 p. (in Russian).
5. Podmasteryev K.V. *Elektroparametricheskiye metody kompleksnogo diagnostirovaniya opor kacheniya*. [Electroparametrical methods of complex diagnosing of rolling bearing supports]. Moscow, Mechanical engineering-1 Publ., 2001. 376 p. (in Russian).
6. Elin L.V., Zaharzhvetskaya N.V. [Electrical resistance of the oil film of lubricants «mashinnoe-2» and transformer oil]. *Odesskiy institut inzhenerov morskogo flota: Nauchnyye trudy* [Odessa Institute of Marine Engineers. Scientific proceedings]. Edition 8. Moscow, Morskoj transport Publ., 1949. pp. 120–134 (in Russian).
7. Korovin N.I., Eysurovich A.I. *Ustrojstvo dlya kontrolya za sostoyaniyem podshipnikov* [The device for monitoring the state of bearings] Patent SU, no. 139128, 11961.
8. Kennel J., Snideker D. [Elastohydrodynamic lubrication of instrument ball bearings] *Trudy amerikanskogo obschestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya. Problemy treniya i smazki*, 1976, no. 2, pp. 57–63 (in Russian).
9. Konchits V.V., Meshkov V.V., Myishkin N.K. *Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov* [Tribotechnology of electrical contacts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. 260 p. (in Russian).
10. Sviridenok A.I., Myishkin N.K., Kalmykova T.F., Xolodilov O.V. *Akusticheskie i elektricheskiye metody v tribotekhnike* [Acoustic and electric methods in tribotechnology]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987, 257 p.
11. Podmasteryev K.V., Mishin V.V., Markov V.V. [Investigation of the influence of deviations form the raceway rings on the condition of the lubricant in the bearing by electric resistance method]. *Trenie i iznos*, 2005, Vol. 26, no. 5, pp. 546-553 (in Russian).

12. Podmasteryev K.V., Paholkin E.V. [Electric method and means to identify local defects in rollings]. *Defectoscopya*, 1998, no. 8, pp. 59–67 (in Russian).
13. Podmasteryev K.V., Paholkin E.V. Sposob diagnostirovaniya tel kacheniya podshipnikov i ustroystvo dlya ego osuschestvleniya [The way to diagnosing rolling elements of bearings and device for its implementation]. Patent RF, no. 2124191, 1998.
14. Podmasteryev K.V., Korndorf S.F., Paholkin E.V. Sposob diagnostirovaniya kolets podshipnikov kacheniya [The way to diagnosing of rings of the rolling bearings]. Patent RF, no. 2110053, 1998.
15. Vavilov V.P., Podmasteryev K.V., Sosnin F.R., Korndorf S.F., Nogacheva T.I., Paholkin E.V., Bondareva L.A., Muzhitskiy V.F. *Nerazrushayuschiy kontrol. Spravochnik v 8 tomah pod obschey redaktsiey V.V. Klyueva. T. 5 Kniga 1. Teplovoy kontrol. Kniga 2. Elektricheskiy kontrol* [Nondestructive testing. Handbook in 8 volumes / Edited by V.V. Klyuev. Vol. 5. Book 1. Thermal Testing. Book 2. Electrical Testing]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2006. 688 p. (in Russian).
16. Paholkin E.V., Podmasteryev K.V. [Devices for tribomonitoring] *Datchiki i sistemy*, 2008, no. 3, pp. 16–19 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.02.2015.

ДИАГНОСТИКА ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО РАБОТЕ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: nilpt@tut.by

Рассмотрены вопросы измерения работы выхода электрона по контактной разности потенциалов и экспериментально обоснована возможность применения этих методов для оценки напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев металлов и сплавов. Разработаны методики и приведены примеры их применения для исследования локализации пластической деформации с применением зонда Кельвина. Показано, что исследование топологии работы выхода электрона деформируемой поверхности позволяет определять вид деформации, изучать динамику дефектов на поверхности, выявлять потенциальные очаги разрушения на локальных участках поверхности.

Ключевые слова: зонд Кельвина–Зисмана, контактная разность потенциалов, работа выхода электрона, поверхность, локализация пластической деформации

Введение

Локализация пластической деформации любых материалов, независимо от их физической природы, кристаллографического состояния и реальной структуры связана со спецификой локализованных сдвиговых неустойчивостей на всех структурных и масштабных уровнях [1, 2]. На атомном уровне пластическое течение обусловлено зарождением и распространением трансляционных дислокаций и представляет собой непрерывную цепь повторяющихся во времени и локализованных в пространстве актов перехода решетки кристалла в механически неустойчивое состояние и последующего выхода из него. На микроуровне это различные неустойчивости трансляционного типа, неустойчивости ротационного типа (частичные дисклинации, их диполи, петли и др.), трансляционно-ротационные неустойчивости. На мезоуровне пластические неустойчивости принимают форму полос сдвига, а также локализованных по цепочкам ранее созданных границ или вдоль новых границ сдвигов и поворотов сопрягающихся областей кристалла. На макроуровне речь идет о крупномасштабных и очень сложных взаимно коррелированных сдвиговых неустойчивостях ротационного типа. Наименьшую сдвиговую устойчивость в

деформируемом твердом теле имеет его поверхностный слой. Поэтому первичные сдвиги зарождаются на поверхности и генерируют в объеме материала все виды деформационных дефектов. Подобную роль играют также внутренние границы раздела подсистем с различной сдвиговой устойчивостью (межфазные и межзеренные границы, двойники, включения, микроскопические поры и трещины и др.) [2].

Хорошо известно, что работа выхода электрона (РВЭ) является чувствительным параметром к описанным выше деформационным эффектам, а именно к изменению концентрации мест выхода дислокаций, поверхностным дефектам, атомарной шероховатости и др. [3–7].

РВЭ (Φ) – это энергия, которую необходимо затратить для удаления электрона из твердого или жидкого вещества в вакуум. Если электростатический потенциал в вакууме ϕ_0 , в веществе ϕ_s , а E_F – энергия Ферми, то РВЭ определяется уравнением [2]:

$$\Phi = (\phi_s - \phi_0) - E_F = \Delta\phi - E_F = 4\pi P_S - E_F \quad (1)$$

Величина $\Delta\phi$ представляет собой разность между электростатическим потенциалом электрона внутри металла и электростатическим потенциалом электрона вне металла в определенной точке. При этом $\Delta\phi = 4\pi P_S$, где P_S – дипольный момент двойного электрического слоя

на единицу площади поверхности. Следовательно, величина РВЭ зависит как от состояния объема металла E_F , так и от состояния его поверхности P_S (кристаллографическая ориентация поверхности, дефекты и т.д.).

Механические воздействия влияют на РВЭ как через уровень Ферми металла, так и через изменение потенциала двойного электрического слоя. При механическом нагружении происходит изменение компактности решетки металла, т.е. изменяется объем кристаллической решетки, а, следовательно, и объем, занимаемый свободными электронами. Это вызывает изменение положения уровня Ферми и тем самым изменение РВЭ. Для большинства металлов и сплавов изменение РВЭ с увеличением сжатия кристалла положительно, т.е. РВЭ возрастает. Типичное изменение РВЭ составляет порядка нескольких микроэлектронвольт/бар [1]. Дефекты кристаллической решетки оказывают более существенное влияние на РВЭ. Атомы в окрестностях дислокаций испытывают значительное гидростатическое давление, создаваемое полем напряжений. В месте выхода дислокаций локальные изменения РВЭ могут составлять величину порядка 10^{-2} – 10^{-1} эВ [4].

Из сказанного выше вытекает целесообразность применения методов, основанных на регистрации отклонений РВЭ поверхности для исследования процессов пластического деформирования материалов.

Целью настоящей работы является разработка методики исследования локальных изменений пластической деформации по регистрации изменений работы выхода электрона по поверхности.

Приборы и методы измерений

Для измерения РВЭ наиболее широко используется метод вибрирующего конденсатора

(зонд Кельвина–Зисмана). Метод является полностью бесконтактным и позволяет измерять контактную разность потенциалов (КРП) между исследуемой и эталонной поверхностями [5].

Эффект КРП и принцип его измерения методом зонда Кельвина–Зисмана поясняются рисунком 1. На рисунке 1а показаны два металла расположенные в тесной близости и разделенные тонким вакуумным зазором, электрический контакт между ними отсутствует. После сближения до некоторого расстояния (рисунок 1б), при котором возможен эффективный обмен электронами, обусловленный термоэлектронной эмиссией, происходит перенос электронов из металла с большей РВЭ в металл с меньшей РВЭ. Поверхность первого металла заряжается положительно, второго – отрицательно. При этом в зазоре возникает электрическое поле и, соответственно, разность потенциалов eU_{CPD} . Условием равновесия в этом случае будет равенство уровней Ферми, а КРП будет равна разности РВЭ между металлами:

$$eU_{CPD} = \phi_1 - \phi_2, \quad (2)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – РВЭ исследуемой и эталонной поверхностей, соответственно; e – заряд электрона; U_{CPD} – КРП.

На рисунке 1в показан физический принцип измерения КРП методом зонда Кельвина–Зисмана в случае двух металлов.

Суть метода заключается в том, что поверхность исследуемого образца M_1 и торцевая поверхность измерительного электрода M_2 , вибрирующего под действием электромеханического вибратора, формируют обкладки плоского конденсатора емкостью C_{12} . Вследствие различия РВЭ материалов пластин конденсатор будет иметь заряд Q , в соответствии с уравнением:

$$Q = C_{12} \frac{\phi_1 - \phi_2}{e} = C_{12} U_{CPD}. \quad (3)$$

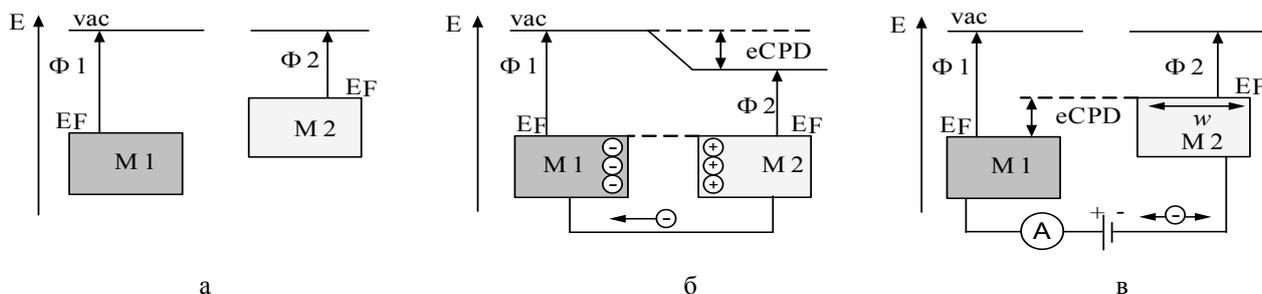


Рисунок 1 – Процесс возникновения контактной разности потенциалов (а, б) и принцип измерения ее зондом Кельвина–Зисмана (в)

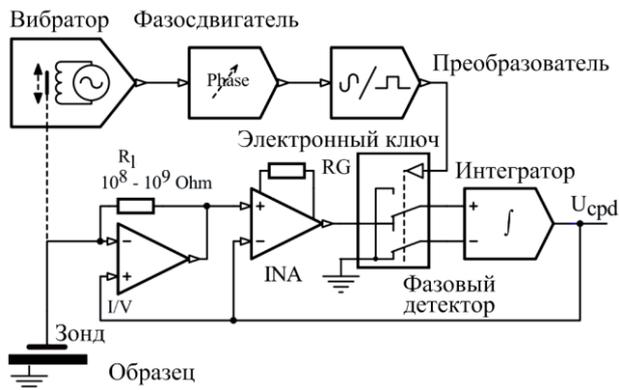


Рисунок 2 – Схема установки для регистрации отклонений работы выхода электрона по исследуемой поверхности при ее сканировании зондом Кельвина-Зисмана [5]

Емкость конденсатора C_{12} при периодическом изменении расстояния между пластинами конденсатора будет периодически изменяться. При достаточно большом сопротивлении резистора R_L заряд не будет успевать стекать с обкладок конденсатора за период изменения емкости. Переменное напряжение с динамического конденсатора поступает на вход предусилителя, затем на индикатор нулевого сигнала. С помощью внешнего источника на конденсатор подается напряжение компенсации U_{comp} такой величины, чтобы переменный сигнал стал нулевым, т.е. чтобы оно скомпенсировало КРП. При этом $U_{comp} = -U_{CPD}$. В методе Кельвина-Зисмана полагается, что КРП не изменяется за период колебаний эталонного образца, поэтому ток в конденсаторе описывается уравнением:

$$i = \frac{dQ}{dt} = U_{CPD} \frac{dC_{12}}{dt} \quad (4)$$

Функциональная схема установки для измерения распределения РВЭ поверхности деформируемых образцов показана на рисунке 2.

Измеритель КРП (разработка НИЛ ПТ БНТУ) с помощью привода вертикального позиционирования (*Parker Hannifin Corporation*, США) размещается над поверхностью исследуемого образца, закрепленного на рабочем столе. Сканирование поверхности образца осуществляется перемещения рабочего столика по меандру по осям X, Y . Двухкоординатный привод приводится в движение шаговыми двигателями (*Parker Hannifin Corporation* США).

Управление сканированием и сбор данных полностью осуществляется с компьютера, оснащенного платой управления приводом AT6400-AUX1-240V *Parker Hannifin Corpora-*

tion (США) и платой сбора данных *PCI - 6024E National Instruments Corporation* (США).

Принцип действия прибора заключается в регистрации отклонения РВЭ по исследуемой поверхности при ее сканировании.

По результатам измерений строится пространственно-топологическое изображение РВЭ в серых тонах. После сканирования происходит запись результатов в виде численного массива, который при необходимости может быть преобразован в удобную для исследований форму.

Описанный метод характеризуется различными совокупностями метрологических параметров и функциональных возможностей: разрешающей способностью, чувствительностью (0,1–1 мэВ), скоростью измерения и др., что позволяет оптимизировать измерения в зависимости от конкретного объекта исследований.

Материалы и методики исследования

В качестве материала опытных образцов использовалась сталь марки 45 (ГОСТ 1050-88).

Исследования проводились по трем схемам приложения нагрузки:

- точечное нагружение;
- одноосное сжатие;
- одноосное растяжение.

Исследование деформации при точечном приложении нагрузки проводилось с целью выявления неоднородности поля деформации при локальном нагружении образца единичной микронеровностью. Для этого использовался твердомер Бринелль ТШ-2м. Шарик диаметром 5 мм вдавливался в поверхность исследуемого образца с нагрузкой 7357 Н ($K = 30$). При такой схеме нагружения, вследствие контактного характера приложения нагрузки, объем материала под индентором испытывает сопротивления окружающих микрообъемов и находится в состоянии всестороннего неравномерного сжатия. На практике это самое мягкое из механических испытаний напряженных состояний, поэтому даже хрупкие материалы не разрушаются, а дают пластический отпечаток. После снятия нагрузки изучалось распределение РВЭ по контактной поверхности образцов.

Во втором случае сжимающая нагрузка прикладывалась к образцам через гладкую стеклянную пластину. После 30 с нагрузка снималась и регистрировалось изменение топологии РВЭ контактной поверхности. Описан-

ные действия повторялись при ступенчатом увеличении удельной нагрузки. Такая схема нагружения позволила проследить эволюцию зарождения и распределение дислокационной подсистемы от степени деформирования.

В третьем случае целью эксперимента явилось выявление мест с повышенной и пониженной плотностью дефектов, что позволило установить закономерности локализации деформации. Для этого образцы соответствующей формы и размеров устанавливались в разрывную машину типа «Instron». Одна из сторон образца шлифовалась, затем полировалась. Для инициирования образования микротрещин вдоль определенной линии, а в дальнейшем и разрыв материала создавался исходный дефект – надрез.

В процессе испытательного цикла регистрировались удлинение образца и РВЭ в зависимости от приложенной нагрузки. В характерных точках на кривой деформации испытания прекращались и производилась регистрация топологии РВЭ.

Результаты исследований и их обсуждение

Вопросы влияния деформирования на РВЭ интенсивно исследовались ранее в работах [6, 7].

В общем случае при простом одноосном растяжении (рисунок 3) до предела пропорциональности, т.е. в области упругих деформаций, РВЭ изменяется незначительно. Наблюдается некоторое увеличение РВЭ с увеличением нагрузки (1–1,5 мэВ) [6].

Дальнейшая деформация выше предела пропорциональности приводит к резкому понижению РВЭ с последующей тенденцией к насыщению. Такое понижение РВЭ связано с образованием и движением дислокаций в поверхностных слоях образца. Следовательно, интегральное значение РВЭ поверхности при пластической деформации может значительно изменяться с изменением плотности дефектов, а в данном случае с изменением плотности мест выхода дислокаций на поверхности.

С дальнейшим повышением нагрузки скорость изменения РВЭ уменьшается и при достижении стадии динамического возврата не зависит от дальнейшего повышения нагрузки. Резкий перегиб изменений РВЭ наблюдался при растяжении как пластичных, так и хрупких материалов, не имеющих площадки текучести.

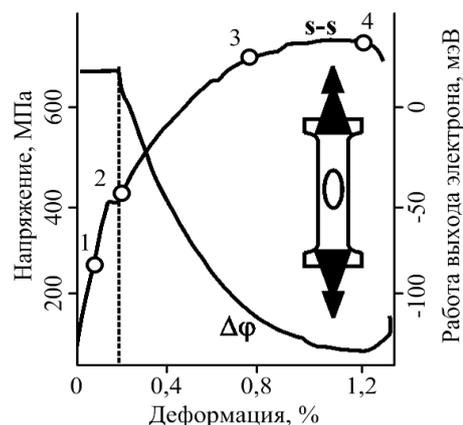


Рисунок 3 – Диаграмма напряжений и зависимость работы выхода электрона от деформации при одноосном растяжении [6]

В работе [7] проводилось исследование зависимости РВЭ от удельной нагрузки в случае простого одноосного сжатия через гладкую стеклянную пластину (рисунок 4), при этом измерялась величина РВЭ контактной и боковой поверхностей образца. Перегиб изменений РВЭ для контактной поверхности ($P_{пов}$) возникает при значительно меньших нагрузках, чем для боковой поверхности ($P_{об}$), т.е. регистрируется начало пластических процессов микрообъемов шероховатости.

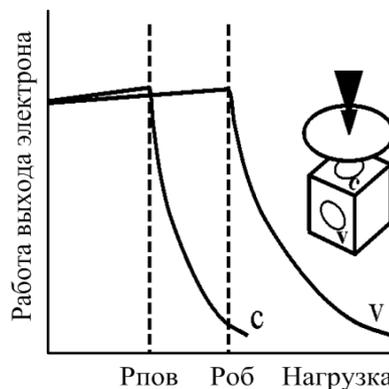


Рисунок 4 – Зависимости работы выхода электрона контактной (C) и боковой (V) поверхностей от нагрузки при одноосном сжатии [7]

Исследования зависимости РВЭ и параметра шероховатости Ra от степени деформации показали (рисунки 5, 6), что изменение РВЭ наступают несколько раньше начала регистрируемых изменений Ra . Таким образом, начало уменьшения РВЭ в данном случае определяет предел текучести в тонком поверхностном слое еще до наступления пластических деформаций, регистрируемых по изменению параметра Ra .

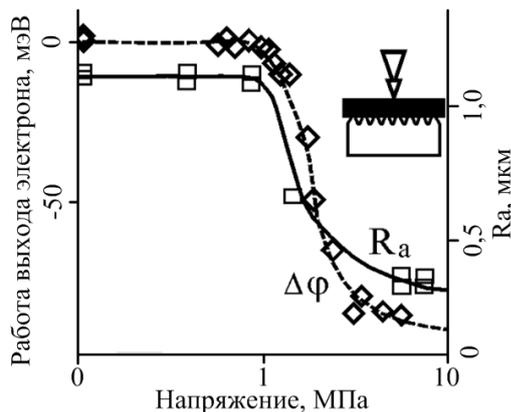


Рисунок 5 – Зависимости работы выхода электрона и параметра шероховатости R_a от удельной нагрузки при нагружении шероховатой поверхности стали 45 гладкой поверхностью контрообразца [7]

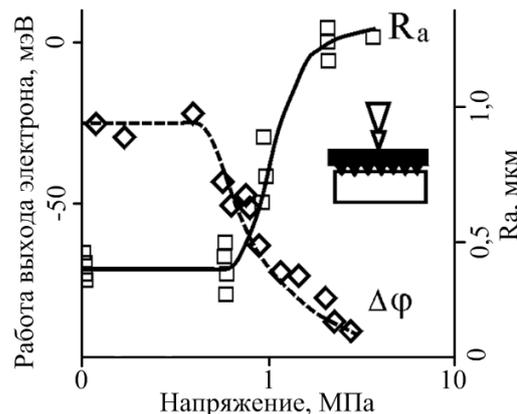


Рисунок 6 – Зависимости работы выхода электрона и параметра шероховатости R_a от удельной нагрузки при нагружении гладкой поверхности стали 45 шероховатой поверхностью контрообразца [7]

В дополнение к изучению влияния деформации на РВЭ нами было проведено исследование топологии РВЭ при нагружении.

На рисунке 7 представлены экспериментальные исследования распределения РВЭ после точечного приложения нагрузки. Из рисунка видно, что РВЭ изменяется немонотонно по оси приложения нагрузки и в общем случае представляет периодическую функцию. Частота и период изменений зависят от степени деформации. Наблюдается значительный разброс РВЭ по поверхности и формирование достаточно большой области с низкой РВЭ, которая в целом характеризует область пластического течения. Таким образом, полученные данные хорошо согласуются с тем, что основной вклад в уменьшение РВЭ при деформации оказывают дефекты, обусловленные пластическим течением в области приложения нагрузки.

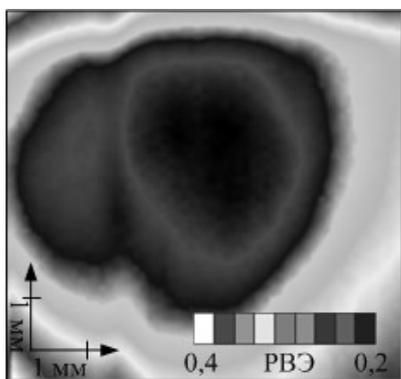


Рисунок 7 – Топология работы выхода электрона при точечном нагружении

На рисунке 8 представлены экспериментальные исследования распределения РВЭ после нагружения образцов через гладкую стеклянную пластину при ступенчатом увеличении контактного давления.

Первоначально на поверхности материала наблюдается хаотическое распределение дефектов (рисунок 8а). Однако уже при небольших деформациях, при контактом давлении 0,2 МПа, формируются области с повышенной плотностью дефектов (рисунок 8б), при этом распределение РВЭ по поверхности становится более равномерным. В общем случае данные области формируются случайным образом. С увеличением степени деформации наблюдается чередование нескольких локальных областей повышенной и пониженной плотности дефектов (рисунок 8в, 8г). С увеличением деформации наблюдается значительный разброс РВЭ по поверхности и формирование достаточно большой области с низкой РВЭ (рисунок 8д, 8е). Из данных исследований становится видно, каким образом на поверхности происходит коллективное движение дислокационных структур. В данном случае на поверхности образца проявляются не только различные виды краевых и винтовых дислокаций, но и дислокации с противоположными знаками. Вероятно, наблюдаемый эффект связан с неоднородной структурой микровыступов шероховатости и с увеличением в процессе нагружения фактической площади контакта на всем интервале от предела текучести и до изменения геометрии поверхностной микроструктуры.

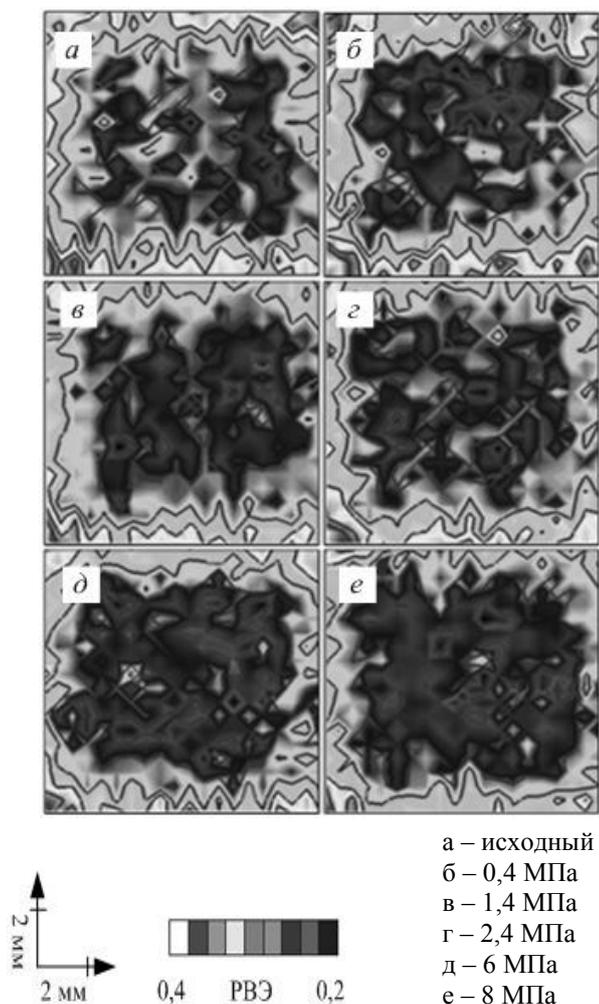


Рисунок 8 – Топология работы выхода электрона контактной поверхности образца из стали 45 при одноосном сжатии

На рисунке 9 представлено изменение топологии РВЭ от степени деформации при одноосном растяжении в соответствующих точках по диаграмме напряжения (рисунок 3).

Из рисунка 9 видно, что на образце, не подвергнутом деформации, наблюдаются регулярно чередующиеся полосы отклонения РВЭ. Такие полосы, как правило, наблюдаются после шлифовки. При деформации порядка 0,1 % и напряжениях, меньших предела текучести, наблюдается незначительное изменение РВЭ по поверхности (рисунок 9а), при этом распределение РВЭ становится более равномерным. С увеличением деформации наблюдается значительный разброс РВЭ по поверхности и формирование достаточно большой области с низкой РВЭ (рисунок 9б). При дальнейшем увеличении напряжений наблюдается уменьшение размеров области с пониженной РВЭ (рисунок

9в). Интенсивное уменьшение РВЭ при деформации обусловлено увеличением плотности дислокаций в поверхностном слое, а именно при начале микропластической деформации. Перед разрушением наблюдается резкое повышение РВЭ в узкой области образования трещины и понижение РВЭ вне области разрушения (рисунок 9г). После разрушения образца распределение РВЭ по поверхности становится более ровным, что, по-видимому, связано с разрядкой дефектов на трещинах.

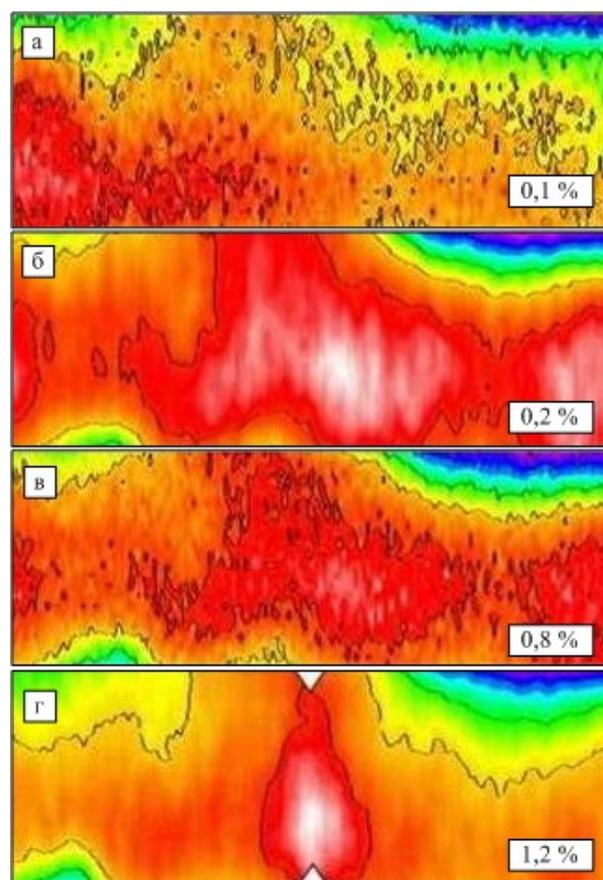


Рисунок 9 – Распределение работы выхода электрона боковой поверхности образца из стали 45 при простом одноосном растяжении в характерных точках по диаграмме напряжения (рисунок 3)

Таким образом, на рисунке 9 прослеживаются зарождение и развитие в поверхностном слое образца локализации пластической деформации задолго до начала текучести (рисунок 3) и появления трещины.

Заключение

В работе экспериментально обоснована возможность применения метода вибрирующе-

го зонда Кельвина–Зисмана для исследований механизмов зарождения и распространения дислокационной подсистемы, а также закономерностей протекающих при этом процессов, в частности локализации пластической деформации по топологии работы выхода электрона.

Предложенные методики позволили получить следующие результаты:

– распределение работы выхода электрона по поверхности вдоль оси нагружения в общем случае имеет волнообразный характер и коррелирует с изменением дислокационных структур при пластической деформации;

– по топологии работы выхода электрона установлено, что общим свойством пластического течения твердых тел является его локализация на всех стадиях деформации, причем тип распределения очагов локализации зависит от степени деформации. Локальное понижение РВЭ может служить в качестве критерия выявления потенциальных мест разрушения. Причем площадь области с низкой работой выхода электрона говорит о степени локализации. Чем более узкая область с пониженной работой выхода электрона, тем более высокая локализация деформации и выше вероятность разрушения материала в этой области.

Список использованных источников

1. Панин, В.Е. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, В.И. Данилов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1990. – 255 с.
2. Малыгин, Г.А. Самоорганизация дислокаций и локализация скольжения в пластически деформируемых кристаллах / Г.А. Малыгин // Физика твердого тела. – 1995. – Т. 37. – № 1. – С. 3–42.
3. Фоменко, В.С. Эмиссионные свойства материалов: справочник / В.С. Фоменков. – Киев : Наукова думка. – 1981. – 338 с.
4. Минц, Р.И. Деформационное изменение работы выхода электрона / Р.И. Минц, В.П. Мелехин, М.Б. Партенский // Физика твердого тела. – 1974. – Т. 16. – № 12. – С. 3584–3586.
5. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg: Springer-Verlag. – 2010. – P. 687–720.
6. Жарин, А.Л. Влияние контактных деформаций на величину работы выхода электрона поверхностей / А.Л. Жарин, Е.И. Фишбеин, Н. Шипица // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 3. – С. 488–504.
7. Жарин, А.Л. Определение вида контактной деформации по работе выхода электрона / А.Л. Жарин, В.А. Генкин, Н.А. Шипица // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – № 1. – С. 173–175.

METHODS FOR LOCAL CHANGES IN THE PLASTIC DEFORMATION DIAGNOSTICS ON THE WORK FUNCTION

Panteleyev K.V., Svistun A.I., Zharin A.L.

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
e-mail: K.pantsialeyeu@live.ru

Abstract. The paper describes the electronic work function measurements by the contact potential difference technique, and experimental demonstration of the possibility of these methods application for the stress-strain state of the surface layer of the metals and alloys. The techniques and examples of their application of localization of plastic deformation studies using the Kelvin probe are developed and present. The study topology of work function the deformed surface possible to determine the type of deformation and dynamics of defects on the surface, identify potential spots of destruction on local areas of plastic deformation.

Keywords: Kelvin–Zisman probe, contact potential difference, work function, surface, localization of plastic deformation.

References

1. Panin V.E., Grinyaev J.V., Danilov V.I. et al. *Strukturnye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 255 p. (in Russian).
2. Malygin G.A. [Self-organization and localization of dislocation slip in plastically deformed crystals]. *Fizika tvjordogo tela*, 1995, T. 37, no. 1, pp. 3–42 (in Russian).
3. Fomenko V.S.. *Emissionnye svoystva materialov: spravochnik* [Emission properties of materials: a handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 338 p. (in Russian).
4. Minc R.I., Melehin V.P., Partenskij. [Strain variation of the work function]. *Fizika tvjordogo tela*, 1974, T. 16, no. 12, pp. 3584–3586 (in Russian).
5. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, pp. 687–720.
6. Zharin A.L., Fishbein E.I., Shipica N.A. [Effect of contact deformations on the value work function of the surfaces]. *Trenie i iznos*, 1995, T. 16, no. 3, pp. 488–504 (in Russian).
7. Zharin A.L., Genkin V.A., Shipica N.A. [Determination of the type of contact deformation on the work function]. *Trenie i iznos*, 1990, T. 11, no. 1, pp. 173–175 (in Russian).

Поступила в редакцию 26.02.2015.

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОЙ РАЗРЕШАЕМОЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

Статья посвящена повышению точности определения минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных систем за счет совершенствования модели визуального восприятия термографических изображений оператором. Рассмотрен алгоритм получения уравнения для расчета минимальной разрешаемой разности температур, в основе которого лежит более достоверная аппроксимация модуляционной передаточной функции зрительной системы, предложенная Д.У. Шульцем. Получено новое выражение для коэффициента ширины полосы для аппроксимации Шульца, которое не зависит от углового размера штриха миры Фуко.

Ключевые слова: тепловидение, оценка эффективности, минимальная разрешаемая разность температур.

Введение

В последние годы благодаря совершенствованию и удешевлению элементной базы тепловизионных приборов существенно возрос спрос на их использование в различных отраслях хозяйственной деятельности человека. Многие производители тепловизоров осуществляют блочную сборку устройств. Комплекующие приобретаются у различных поставщиков или частично изготавливаются самостоятельно. Для согласования отдельных блоков тепловизоров, обоснования требований к основным функциональным узлам, сравнения устройств используются различные методы анализа и синтеза [1–6]. В зависимости от назначения устройства в методы закладываются критерии оценки качества и эффективности. Например, для потребителей систем наблюдения важны дальности обнаружения и распознавания объектов и т.п. Однако во многих случаях требуются менее обобщенные характеристики качества, которые позволяют достаточно полно оценивать свойства тепловизионных приборов. Наиболее важными характеристиками тепловизоров являются пространственная и температурная разрешающая способность, взаимосвязь между которыми устанавливает минимальная разрешаемая разность температур

(*Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD*). В некоторых учебниках и монографиях [4–6] были получены уравнения для расчета *MRTD*, в основе которых лежит ряд допущений, предложенных Дж. Ллойдом еще в начале 1970-х гг. [7]. В то же время экспериментальные исследования, проведенные на предприятии «Арсенал» (г. Киев), свидетельствуют о различии полученных результатов теоретических расчетов. Поэтому возникает потребность в дальнейшем усовершенствовании метода расчета *MRTD* с целью получения более достоверных значений этой функции.

Целью статьи является усовершенствование метода расчета *MRTD* тепловизоров за счет использования более совершенной модели восприятия наблюдателем термографического изображения.

Уравнение расчета минимальной разрешаемой разности температур

Минимальная разрешаемая разность температур $MRTD(\nu_x)$ определяется минимальной разностью эффективных температур между штрихами тест-объекта заданной пространственной частоты ν_x и фоном, при которой наблюдатель может визуально различить штрихи изображения объекта на экране дисплея тепловизора. Тест-

объект представляет собой четырехштриховую миру Фуко, в которой полосы и промежутки имеют одинаковую ширину V_{tp} , а их высота равна $7V_{tp}$. Это позволяет рассматривать одномерную модель, полагая, что большие вертикальные размеры тест-объекта не вызывают заметных частотных искажений в горизонтальном направлении. Предполагается, что полосы и промежутки излучают как абсолютно черное тело. Пространственная частота может быть выражена как в линейных, так и в угловых величинах (обычно в миллиметрах⁻¹ или миллирадианах⁻¹).

Получим уравнение для расчета $MRTD$, используя усовершенствованный алгоритм, приведенный в [5, 6]. Одним из дискуссионных допущений Ллойда является механизм восприятия зрительной системой изображения миру Фуко на экране дисплея. Было предложено пространственное интегрирование глаза вдоль координаты сканирования x учитывать согласованной передаточной функцией, которая определяется угловым размером ξ''_{tp} изображения штриха миру на экране дисплея. При этом модуляционная передаточная функция (МПФ) зрительной системы аппроксимируется функцией [7]:

$$M_{E,L}(v_x) = \frac{\sin(\pi \xi''_{tp} v_x)}{\pi \xi''_{tp} v_x} = \text{sinc}(\xi''_{tp} v_x). \quad (1)$$

Исследованию МПФ зрительной системы посвящено большое количество работ, например [8–10]. На рисунке 1 показаны графики реальной МПФ зрительной системы [10] и ее аппроксимации Дж. Ллойдом (уравнение (1)) и Д.У. Шульцем (уравнение (2)) [11]:

$$M_{E,S}(v_x) = 2,7[\exp(-0,1lv_x) - \exp(-0,35v_x)], \quad (2)$$

где пространственная частота v_x имеет размерность град⁻¹.

Анализ приведенных графиков показывает, что, во-первых, аппроксимация Ллойда (1) заметно отличается от реальной МПФ зрительной системы, особенно на низких пространственных частотах; во-вторых, аппроксимация Шульца в значительной степени соответствует реальной МПФ зрительной системы. Поэтому для получения уравнения расчета $MRTD$ будем использовать аппроксимацию Шульца (2).

Одномерный механизм зрительного восприятия изображения миру Фуко будем учитывать через отношение сигнал/шум на выходе

эталонного фильтра, для которого справедлива пропорциональность:

$$SNR_f \approx \frac{M_{tp,E} \Delta T}{NETD}, \quad (3)$$

где ΔT – температурный контраст миру Фуко; $M_{tp,E}$ – функция передачи контраста тепловизора; $NETD$ – эквивалентная шуму разность температур.

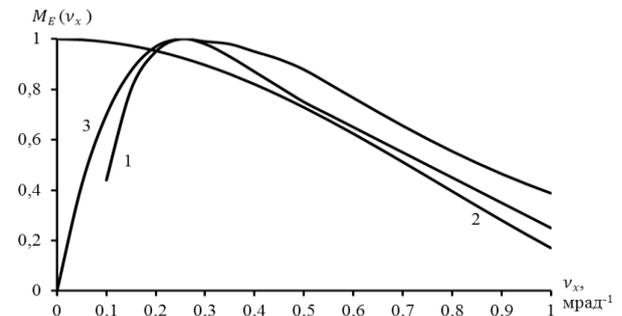


Рисунок 1 – Модуляционная передаточная функция зрительной системы человека: 1 – экспериментально полученная; 2 – аппроксимация (1), при $\xi''_{tp} = 0,85$ мрад; 3 – аппроксимация (2)

Функция передачи контраста тепловизора с учетом зрительного восприятия связана с МПФ $M_s(v_x)$ соотношением [6]:

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s. \quad (4)$$

Пространственное интегрирование в зрительной системе увеличивает воспринимаемое отношение сигнал/шум в $\sqrt{\xi''_{tp,x} \xi''_{tp,y} / \alpha_D \beta_D} = \sqrt{\xi''_{tp,x} \xi''_{tp,y} / \alpha_D \beta_D} = \xi''_{tp} \sqrt{7 / \alpha_D \beta_D}$ раз [5, 6], где $\xi''_{tp,x}, \xi''_{tp,y}$ – угловые размеры изображения штриха миру Фуко на экране дисплея вдоль соответствующих осей.

С учетом этих замечаний, воспринимаемое отношение сигнал/шум на экране имеет вид [5, 6]:

$$SNR_E = \frac{8}{\pi^2} \frac{\Delta T}{NETD} M_s(v_x) \xi_{tp} \sqrt{\frac{7 f_f t_E}{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}}, \quad (5)$$

где f_f – частота кадров; t_E – постоянная времени зрительной системы; ξ_{tp} – угловой размер штриха миру; $\alpha_D \beta_D$ – угловые размеры пиксела приемника излучения; $k_{\Delta f}$ – коэффициент ширины полосы, показывающий отличие ре-

альной полосы пропускания тепловизора с учетом зрительного восприятия от эффективной шумовой полосы эталонного фильтра.

Последний коэффициент вычисляют как:

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^{\infty} NPS(f) M_{el}^2(f) M_S^2(f) M_E^2(f) df}{\Delta f}, \quad (6)$$

где $NPS(f)$ – спектр мощности шума приемника излучения; $M_{el}(f)$, $M_S(f)$, $M_E(f)$ – МПФ электронного блока, дисплея и зрительной системы соответственно.

Угловой размер изображения штриха ξ''_{tp} в пространстве изображений в формуле (5) связан с угловым размером штриха ξ_{tp} в пространстве предметов соотношением:

$$\frac{\xi''_{tp}}{\xi_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{el}}{R_{SE}}, \quad (7)$$

где f'_o – фокусное расстояние объектива; β_{el} – электронное увеличение тепловизора; R_{SE} – расстояние между экраном и зрительной системой.

Угловая пространственная частота v_x в МПФ дисплея и зрительной системы v_x'' связаны с временной частотой f соотношениями:

$$v_x = \frac{t_o}{\alpha_D} f \text{ и } v_x'' = \frac{v_x}{\Gamma_s}, \quad (8)$$

где t_o – время формирования одного элемента расписания изображения, с; α_D – угловой размер пикселя, мрад; Γ_s – угловое увеличение тепловизора.

Для практического применения соотношения (5) упростим его согласно рекомендациям Дж. Ллойда [7]: электронный блок и дисплей имеют достаточно широкие эффективные полосы пропускания по сравнению с полосой пропускания зрительной системы, объектива и приемника излучения, т.е. $M_{el}(f) \approx 1$, $M_S(f) \approx 1$; шумовой сигнал в пределах этой полосы является «белым», т.е. $NPS(f) \approx 1$.

Тогда коэффициент ширины полосы (6) с учетом (8) при угловом увеличении $\Gamma_s = 1$ будет иметь вид:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-1,92 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) - \exp\left(-5,67 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) \right]^2 df. \quad (9)$$

Вычисление интеграла (9) дает следующий результат:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \frac{\alpha_D}{t_o} 0,138 \approx \frac{\alpha_D^*}{t_o \Delta f}, \quad (10)$$

где α_D^* – безразмерная величина, численно равная угловому размеру пикселя в миллирадианах.

Коэффициент ширины полосы, полученный Дж. Ллойдом, определяется как:

$$k_{\Delta f, L} = \frac{\alpha_D}{2 \xi_{tp} t_o \Delta f}. \quad (11)$$

На рисунке 2 приведены графики функций (9) и (11) в зависимости от угловых размеров штриха миры. Анализ графиков показывает, что они совпадают между собой, когда угловой размер штриха равен $\xi_{tp} = 0,5$ мрад = 1,72 угл. мин.

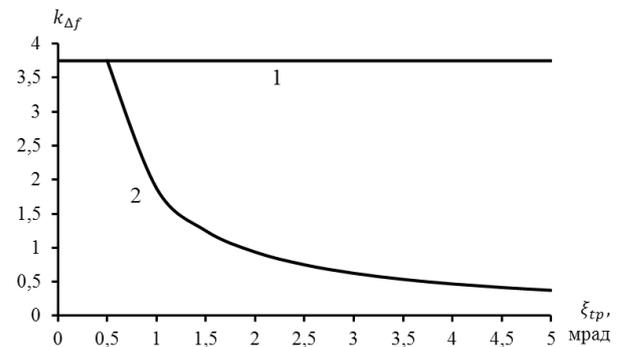


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ширины полосы системы «тепловизор – зрительная система» от углового размера ξ_{tp} штриха миры Фуко, когда $\alpha_D = 1,88$ мрад и $t_o \Delta f = 0,5$: 1 – для аппроксимации Шульца (9); 2 – для аппроксимации Ллойда (11)

Вероятность различения штрихов в изображении миры Фуко зависит от воспринимаемого отношения сигнал/шум $SNR_r = SNR_E$. Например, для вероятности распознавания 90 % необходимо, чтобы $SNR_E = 4,5$. Если подставить это значение в формулу (5), то ΔT будет искомым функцией $MRTD(v_x)$ пространственной частоты v_x :

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{\pi^2}{8} SNR_r \times \times NETD \frac{1}{M_S(v_x) \xi_{tp}} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \alpha_D^3 \beta_D}{7 f f t_E}}. \quad (12)$$

Подставим (9) в (12) с учетом того, что пространственная частота $v_x = 1/2\xi_{sp}$. Тогда $MRTD$ будет определяться уравнением:

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x \alpha_D^*}{M_S(v_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}} \quad (13)$$

В работах [5, 7] было получено подобное уравнение для расчета $MRTD$, в основе которого лежит аппроксимация Дж. Ллойда МПФ зрительной системы (11):

$$MRTD_L(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{v_x}{M_S(v_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}} \quad (14)$$

Анализ уравнений (13) и (14) показывает, что при условии $\alpha_D^* = 0,71$ эти уравнения совпадают между собой.

Пример расчета минимальной разрешаемой разницы температур

В качестве примера рассчитаем $MRTD$ тепловизора на базе передающей камеры *Thermal Eye TSC*, которая имеет следующие характеристики:

- приемник излучения – микроболометрическая матрица размером $p \times q = 160 \times 120$ пикселей;
- размер пиксела $V_D \times W_D = 30 \times 30$ мкм²;
- температурная чувствительность $NETD = 0,1$ К;
- фокусное расстояние объектива $f_o = 16$ мм при относительном отверстии 1:1;
- угловое поле зрения $2\omega_{ox} \times \omega_{oy} = 17 \times 12$;
- частота кадров $f_f = 30$ Гц.

Для расчета функции $MRTD_S(v_x)$ по формуле (13) используем методику, приведенную в учебнике [5]:

1. В исходной формуле (13) известны: $SNR_r = 4,5$ (для вероятности различения штрихов мира 90 % по критериям Джонсона), $NETD = 0,1$ К; $f_f = 30$ Гц; $t_E = 0,2$ с.

2. Угловые размеры пиксела микроболометрической матрицы равны:

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад.}$$

3. При оптимальном согласовании полосы пропускания Δf и времени t_o формирования одного элемента разложения изображения справедливо соотношение: $\Delta f t_o = 0,5$.

4. МПФ тепловизора $M_S(v_x)$ с высококачественным объективом определяется размером пиксела α_D приемника излучения, т.е.:

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад,}$$

$$M_S(v_x) \approx M_D(v_x) = \sin c(v_x \alpha_D) = \frac{\sin(1,87\pi v_x)}{1,87\pi v_x}.$$

После подстановки исходных параметров в уравнение (13) получим функцию для расчета $MRTD$:

$$MRTD_S(v_x) = 0,93 \cdot 4,5 \cdot 0,1 \cdot 1,87 v_x \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right] \times \sqrt{\frac{1,87^2}{0,5 \cdot 30 \cdot 0,2}} = 0,845 v_x \left[\frac{1,87\pi v_x}{\sin(1,87\pi v_x)} \right].$$

На рисунке 3 приведены графики $MRTD$ тепловизора с передающей камерой *Thermal Eye TSC*, построенные по формулам (13) и (14).

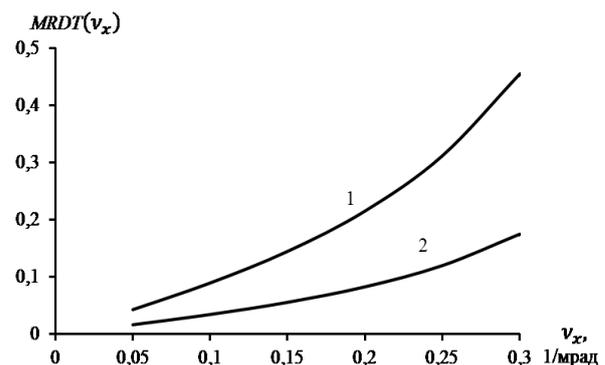


Рисунок 3 – Минимальная разрешаемая разность температур тепловизора с камерой *Thermal Eye TSC* для аппроксимаций зрительной системы Шульцем (1) и Ллойдом (2)

Анализ этих функций показывает, что: – значения функций $MRTD_S(v_x)$ и $MRTD_L(v_x)$ отличаются между собой в 2,6 раза;

– функция $MRTD_S(v_x)$ зависит от параметра α^*_D . При $\alpha^*_D = 0,71$ функции $MRTD_S(v_x)$ и $MRTD_L(v_x)$ совпадают между собой.

Заключение

Получено усовершенствованное уравнение для расчета минимальной разрешаемой разности температур тепловизора, в основе которого лежит более достоверная аппроксимация модуляционной передаточной функции зрительной системы, предложенная Д.У. Шульцем.

Исследование уравнений для расчета минимальной разрешаемой разности температур, в которых использованы модуляционные передаточные функции зрительной системы, предложенные Дж. Ллойдом и Д.У. Шульцем, показало, что для рассматриваемой модели тепловизионной системы:

– расчетные значения минимальной разрешаемой разности температур по этим уравнениям существенно отличаются между собой;

– коэффициент ширины полосы, показывающий различие между реальной полосой пропускания тепловизора с учетом зрительного восприятия и эффективной шумовой полосой эталонного фильтра, полученный Дж. Ллойдом, зависит от углового размера штриха миры Фуко, а для аппроксимации Шульца – не зависит. В этом заключается принципиальное отличие полученного уравнения для расчета минимальной разрешаемой разности температур от известных уравнений.

Дальнейшие исследования следует направить на усовершенствование уравнения расчета минимальной разрешаемой разности температур с учетом влияния характеристик дисплея и условий наблюдения.

Список использованных источников

1. *Vollmerhausen, R.H.* Analysis and evaluation of sampled imaging systems / R. H. Vollmerhausen, D. Reago, R. G. Driggers. – Bellingham, SPIE Press, 2010. – 304 p.
2. *Wishart, G.C.* The accuracy of digital infrared imaging for breast cancer detection in women undergoing breast biopsy / G.C. Wishart, M. Campisi, M. Boswell [et al.] // *European Journal of Surgical Oncology*. – 2010. – Vol. 36 (6). – P. 535–540.
3. *Leachtenauer, J.C.* Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction / J. C. Leachtenauer, R. G. Driggers. – Artech House, Incorporated, 2001. – 419 p.
4. *Тарасов, М.М.* Инфракрасные системы «смотрящего» типа / М.М. Тарасов, Ю.Г. Якушенок. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
5. *Колобродов, В.Г.* Проектирование тепловизионных и телевизионных систем наблюдения : учебник / В.Г. Колобродов, Н.И. Лихолит. – Киев : НТУУ «КПИ», 2007. – 364 с.
6. *Мирошников, М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов : учеб. пособие для приборостроит. вузов / М.М. Мирошников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
7. *Ллойд, Дж.* Системы тепловидения / Дж. Ллойд; пер. с англ. – М. : Мир, 1978. – 416 с.
8. *Blackwell, H.R.* Contrast thresholds of the human eyes / H.R. Blackwell // *Journal of the Optical Society of America*. – 1946. – Vol. 36, №11. – P. 624–643.
9. *Campbell, F.W.* Optical Quality of the Human Eye / F.W. Campbell, R.W. Gubisch // *Journal of Physiology*. – 1966. – Vol. 186(3). – P. 558–578.
10. *Barten, P.G.J.* Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality / P.G.J. Barten; Bellingham: SPIE Press, 1999. – 211p.
11. *Карасик, В.Е.* Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 174 с.

ESTIMATION OF THERMAL IMAGER MINIMUM RESOLVABLE TEMPERATURE DIFFERENCE

Ahmed M.L. Al-Mzirawi, Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine
e-mail: v.mikitenko@nil-psf.kpi.ua

Abstract. The paper is devoted to improving the accuracy of determining the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of thermal imagers by means of more sophisticated models of thermal images visual perception. An MRTD calculating algorithm, which is based on a more reliable approximation of the visual system modulation transfer function by Schultz, is considered. New expression for the bandwidth of Schultz's approximation, which does not depend on the angular size of the Foucault pattern bar, was obtained.

Keywords: thermovision, performance evaluation, minimum resolvable temperature difference.

References

1. Vollmerhausen R.H., Reago D., Driggers R.G. *Analysis and evaluation of sampled imaging systems*. Bellingham, SPIE Press, 2010, 304 p.
2. Wishart G.C., Campisi M., Boswell M., et al. The accuracy of digital infrared imaging for breast cancer detection in women undergoing breast biopsy. *European Journal of Surgical Oncology*, 2010, vol. 36 (6), pp. 535–540.
3. Leachtenauer J.C., Driggers R.G. *Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction*. Artech House, Incorporated, 2001, 419 p.
4. Tarasov M.M., Yakushenkov Yu.G. *Infrakrasnye sistemy smotryashchego tipa* [Forward looking Infrared systems]. Moscow, Logos Publ., 2004, 444 p. (in Russian).
5. Kolobrodov V.G., Liholit N.I. *Proektirovaniye teplovizionnykh i televisionnykh system nablyudeniya* [Development of thermovision and television systems]. Kiev, NTUU “KPI” Publ., 2007, 364 p. (in Russian).
6. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskiye osnovy optiko-elektronnykh priborov* [Theoretical foundation for optoelectronic devices]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1983. 696 p. (in Russian).
7. Lloyd J. *Teplovizionnyye sistemy* [Thermal Imaging Systems]. Moscow, Mir Publ., 1978, 416 p. (in Russian).
8. Blackwell H.R. Contrast thresholds of the human eyes. *Journal of the Optical Society of America*, 1946, vol. 36, № 11, pp. 624–643.
9. Campbell F.W., Gubisch R.W. Optical Quality of the Human Eye. *Journal of Physiology*, 1966, vol. 186(3), pp. 558–578.
10. Barten P.G.J. *Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality*. Bellingham: SPIE Press, 1999. – 211p.
11. Karasik V.E., Orlov V.M. *Lazernyye sistemy videniya* [Laser imaging systems]. Moscow, MGTU im. Bauman N., 2001, 174 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.12.2014.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ РАДИОИЗОТОПНОГО ПЛОТНОМЕРА

Ермакович О.Л., Лисовский Г.А., Кучинский П.В., Титовицкий И.А.

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: ligeal@mail.ru

Проведены экспериментальные исследования пространственного распределения рассеянных бета-частиц в измерительном зазоре радиоизотопного плотнoмера. Предложена схема измерений, основанная на использовании локальной области входного окна ионизационной камеры. Определены средние углы рассеяния в пленках полиэтилентерефталата. Предложено техническое решение, позволяющее более чем в 3 раза снизить погрешность измерений радиоизотопного плотнoмера.

Ключевые слова: бета-частицы, радиоизотопный плотномер, измерительный зазор, полиэтилентерефталат (ПЭТФ).

Введение

Одной из проблем при использовании радиоизотопного плотнoмера в составе сканирующей системы для непрерывного контроля массы квадратного метра бумажного полотна является проблема по минимизации систематической погрешности $\Delta_{\text{сист}}$ прибора при вертикальном смещении полотна в измерительном зазоре. Указанный сдвиг вызывает нежелательное изменение сигнала детектора, которое обрабатывающая программа ошибочно воспринимает как изменение массы. Причина изменения сигнала – уширение первичного пучка бета-частиц в результате их рассеяния в контролируемом материале и, как следствие, выход части потока в малочувствительную область детектора или вовсе за его пределы. Именно рассеяние бета-частиц обуславливает чувствительность получаемой информации к геометрии измерительного тракта, что нашло подтверждение в экспериментах по измерению коэффициента поглощения бета-частиц [1].

Снижение указанной погрешности можно реализовать путем локализации рассеянного излучения в более узком телесном угле. При этом не следует забывать, что любое ограничение потока бета-частиц вызывает рост случайной составляющей $\Delta_{\text{сл}}$ основной погрешности Δ , вызванной статистическим характером радиоактив-

ного распада источника Кг-85. В этой связи необходимо находить оптимальное соотношение между снижением $\Delta_{\text{сист}}$ и ростом $\Delta_{\text{сл}}$. Одним из способов уменьшения погрешности плотнoмера является коллимация излучения непосредственно перед входным окном камеры. Однако без детального изучения процессов рассеяния в измерительном тракте радиоизотопного плотнoмера, невозможна целенаправленная разработка конструкции такого коллиматора.

Цель работы – выработать техническое решение по уменьшению погрешности измерений радиоизотопного плотнoмера путем определения средних углов в пространственном распределении рассеянного излучения в пленках мер поверхностной плотности (МПП) и исследования угловой зависимости отклика камеры при зондировании узким лучом бета-излучения в радиальном направлении.

Методика эксперимента

В качестве датчика потока бета-частиц использовался блок детектирования радиоизотопного плотнoмера ЛЕБ-1 с цилиндрической токовой ионизационной камерой LND 52024. Входное окно камеры диаметром 70 мм представляло собой стальную фольгу толщиной 25 мкм. Выходной сигнал усиливался предварительным усилителем и далее поступал на

вход АЦП. Сигнал камеры (десятичный код АЦП) пропорционален суммарной энергии потока частиц, проникающих в ее рабочий объем. В качестве источника бета-излучения использовался блок излучателя плотномер с закрытым источником ВКг.Р02, заполненного радионуклидом Кг-85 активностью 10 ГБк. Средняя энергия излучаемых бета-частиц – 0,246 МэВ, максимальное значение в спектре – 0,674 МэВ. В конструкцию блока излучателя установлены дополнительные коллиматоры, формирующие узкий поток бета-частиц с углом раствора $\sim 12^\circ$. Вплотную к выходному окну коллиматоров помещались калиброванные МПП на основе пленок полиэтилентерефталата (лавсана) с номинальными значениями плотности, г/м^2 : 69, 178 и 400. Для оценки изменения погрешности при коллимации излучении производилась градуировка плотномер в штатном снаряжении с помощью набора МПП [2].

Достаточно большой радиус входного окна ионизационной камеры, равный 35 мм, позволяет с помощью отверстия с радиусом 1 мм сканировать в радиальном направлении ее отклик на поток рассеянного излучения. Указанное отверстие выполнено в стальной экранирующей пластине, перекрывающей входное окно камеры и оставляющей свободной для прохождения излучения лишь малую область (рисунок 1а). Пластинка сдвигалась в плоскости, параллельной входному окну, с шагом 1 мм с одновременной регистрацией сигнала. Далее сигнал нормировался на свое максимальное значение при радиальной координате сканирующего отверстия $\rho = 0$.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная угловая зависимость нормированного сигнала ионизационной камеры $N(\theta)$ несет в себе лишь частичную информацию об угловом распределении рассеянного излучения и требует внесения корректирующих поправок, вызванных следующими двумя обстоятельствами. Первое связано с пропускной способностью в схеме измерения и обусловлено тем, что с ростом ρ усиливается влияние стенок отверстия.

Это влечет за собой появление теневой области от падающего потока (заштрихованная область на рисунке 1б) и, как следствие, сокращение площади зоны «засветки» в области дна отверстия, а также телесного угла, под которым видна площадка в направлении угла θ .

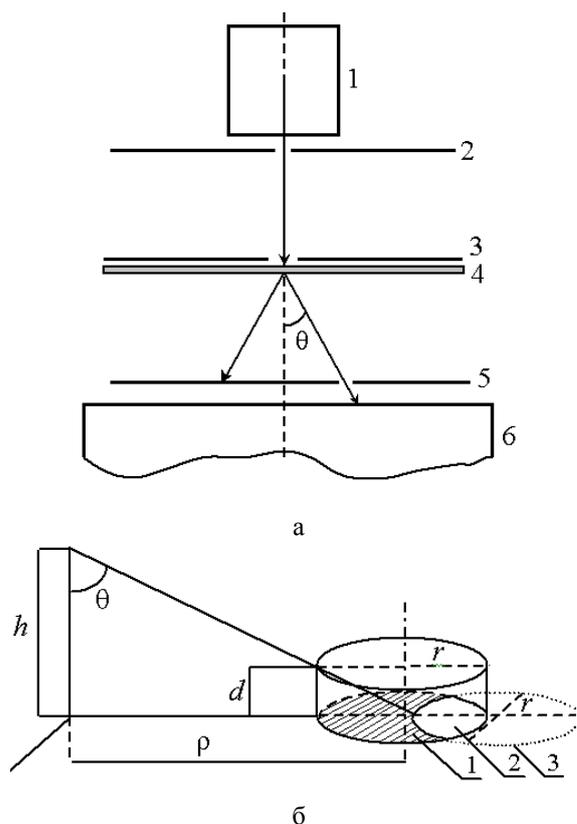


Рисунок 1 – Схема измерений (а) и зона пропускания (б). а: 1 – источник Кг-85; 2,3 – коллиматор блока излучателя; 4 – пленка полиэтилентерефталата; 5 – экранирующая пластина со сканирующим отверстием; 6 – ионизационная камера. б: 1 – область тени; 2 – область пропускания; 3 – проекция верхней кромки отверстия на плоскость наблюдения в направлении угла θ

В геометрическом смысле зона «засветки» представляет собой фигуру в форме двух круговых сегментов, образованных пересечением двух одинаковых окружностей радиусом 1 мм с центрами, сдвинутыми относительно друг друга. Суммарная площадь сегментов определяется соотношением:

$$S = r^2 \cdot (\gamma - \sin(\gamma)), \quad (1)$$

где r – радиус сканирующего отверстия; γ – угол между двумя линиями, проведенными из центра окружности к точкам пересечения с другой окружностью. Угол γ зависит от радиальной координаты сканирующего отверстия ρ (рисунок 1б) и определяется соотношением:

$$\gamma = a \cos\left(\frac{d}{2 \cdot r} \cdot \frac{\rho}{H}\right), \quad (2)$$

где d – глубина сканирующего отверстия; H – расстояние (7 мм) от рассеивающей пленки МПП до плоскости наблюдения. Угол рассеяние θ связан с геометрией измерений: $\theta = \text{atan}(\rho/H)$. Телесный угол, под которым видна область «засветки», приближенно можно определить:

$$\Omega(\theta) = \frac{S \cdot \cos(\theta)}{\rho^2 + H^2} \quad (3)$$

Нормирование телесного угла на его максимальное значение при нулевом значении угла θ определяет корректирующий коэффициент $\xi_1(\theta)$ в величине регистрируемого сигнала:

$$\xi_1(\theta) = \Omega(\theta)/\Omega(0) \quad (4)$$

Результаты расчета представлены на рисунке 2а (кривая 1). Как видим, с ростом θ пропускная способность отверстия уменьшается.

Второй фактор, который необходимо учитывать при обработке результата измерений, связан с угловой зависимостью ослабления потока материалом входного окна камеры по причине изменения эффективной толщины окна:

$$d_{\text{эфф}} = d_{\text{ок}} / \cos(\theta), \quad (5)$$

где $d_{\text{ок}}$ – толщина материала входного окна ионизационной камеры, см.

Кроме того, часть рассеянного излучения может попасть в периферийную зону рабочего объема камеры, где пробег частиц ограничен боковыми стенками камеры. В этой связи, изучался отклик камеры на сканирование ее входного окна узким коллимированным бета-лучом, направленным под разными углами θ . Результаты измерений показаны на рисунке 3.

Применительно к рассеянному излучению из рисунка 3 видно, что в диапазоне от 0 до 37° излучение локализовано в круге радиуса 22 мм. Для углов больших 37° излучение затрагивает периферийную зону камеры и при смещении МПП по направлению к блоку излучателя картина будет усугубляться, что вызывает появление систематической (позиционной) погрешности.

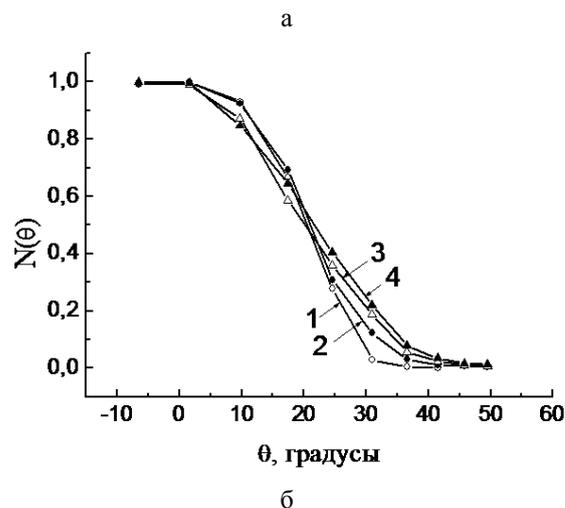
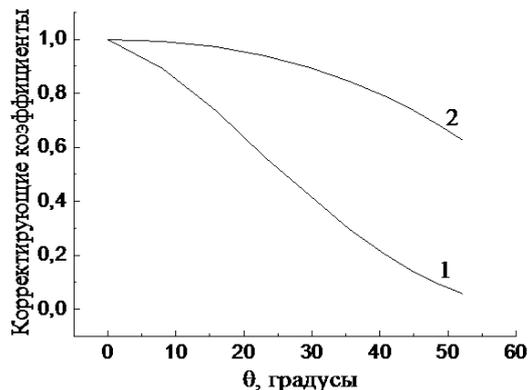


Рисунок 2 – Корректирующие коэффициенты (а) и нормированный сигнал камеры $N(\theta)$ (б) в зависимости от положения сканирующего отверстия для пленок лавсана различной плотности, $\text{г}/\text{м}^2$. а: 1 – 0; 2 – 69; 3 – 178; 4 – 400. б: 1 – ξ_1 ; 2 – ξ_2

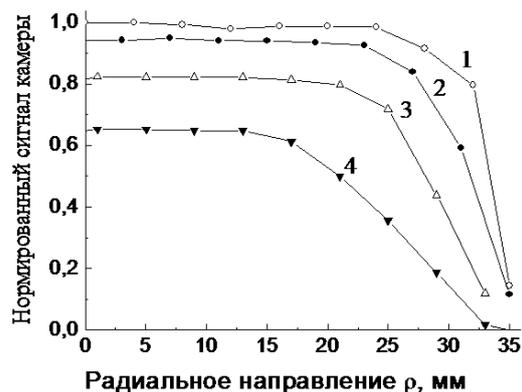


Рисунок 3 – Зависимость выходного сигнала ионизационной камеры от радиальной координаты сканирующего отверстия ρ для различных углов θ : 1 – 0° (нормальное падение); 2 – 17°; 3 – 37°; 4 – 52°

Последовательное уменьшение сигнала на плато представленных кривых связано с увеличением эффективной толщины входного окна с ростом угла. В приближении экспоненциального закона ослабления, угловой коэффициент оконного ослабления ξ_2 запишется в нормированном виде как отношение расчетного потока, проникающего под углом в рабочий объем камеры, к аналогичному значению для случая нормального падения:

$$\xi_2(\theta) = \exp\left(\mu \cdot \eta \cdot d_{ок} \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\theta)}\right)\right), \quad (6)$$

где μ – массовый коэффициент ослабления излучения, $\text{см}^2/\text{г}$; η – удельная плотность ($\text{г}/\text{см}^3$) материала входного окна ионизационной камеры. Массовый коэффициент ослабления бета-излучения ($\text{см}^2/\text{г}$ [3]):

$$\mu = 15,2 \cdot \frac{Z^4}{A} \cdot \frac{1}{E_{max}^{1,485}}, \quad (7)$$

где Z, A – атомный номер и атомная масса материала входного окна; E_{max} – максимальное значение энергии в спектре бета-излучения, МэВ. Результаты расчета $\xi_2(\theta)$ показаны на рисунке 2а (кривая 2).

На рисунке 2б представлены экспериментальные результаты нормированного сигнала камеры при радиальном сканировании отверстием для следующих рассеивающих материалов: воздушная среда и система «воздух – МПП». Сканирование осуществлялось в диапазоне по ρ от 0 до 9 мм, что соответствует углам θ от 0 до $52,1^\circ$. Разделив экспериментальные значения $N(\theta)$ на корректирующие коэффициенты, получим функцию распределения потока рассеянной энергии бета-частиц в единичном телесном угле, описанном вокруг направления θ :

$$f(\theta) = \frac{N(\theta)}{\xi_1(9) \cdot \xi_2(\theta)}. \quad (8)$$

Принимая во внимания аксиальную симметрию рассеянного излучения, полный поток в полусферу равен:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta) \cdot d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} f(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta = 2\pi \int_0^{\pi/2} F(\theta) \cdot d\theta. \quad (9)$$

Для вероятностной трактовки функции $F(\theta)$ необходимо (9) умножить на нормировочный коэффициент, который обратит результат интегрирования в единицу. Поскольку в нашем случае аналитический вид функции $f(\theta)$ неизвестен, а известны лишь ее дискретные значения, то операцию интегрирования можно заменить на операцию суммирования. Запишем условие нормировки:

$$k \cdot \sum_{i=1}^n F(\theta_i) = k \cdot \sum_{i=1}^n f(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i) = 1, \quad (10)$$

где $n = 9$ – число сканирующих шагов. Отсюда находим нормировочный коэффициент k . Тогда средний угол рассеяния определяется суммированием первых моментов дискретного распределения:

$$\theta_{cp} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot f(\theta_i) \cdot \sin(\theta_i). \quad (11)$$

Результаты вычисления средних углов рассеяния по формуле 11 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Средние углы рассеяния

Масса мер поверхностной плотности, $\text{г}/\text{м}^2$	0	69	178	400
Средний угол рассеяния θ_{cp} , градусы	<8	26,6	29,3	30,8

Следует отметить сравнительно слабое рассеяние в случае отсутствия МПП на пути пучка бета-частиц, что вызвано рассеянием в столбе воздуха с расчетной массой $\sim 9 \text{ г}/\text{м}^2$. Так как при расчетах предполагается локализация рассеивателя вплотную к выходному коллиматору блока излучателя, то для воздуха они не применимы. Можно лишь оценить верхний предел угла рассеивания из следующих соображений. Геометрия коллиматора обеспечивает конус, радиус основания которого в плоскости наблюдения равен 3,8 мм, что соответствует в схеме отсчета углов (рисунок 1) $\sim 28^\circ$. Выход излучения за пределы этого конуса обусловлен процессами непрерывного расширения пучка за счет рассеивания в воздухе. Действительно, как

видно из рисунка 2б (кривая 1), сигнал на уровне 0,1 соответствует углу $\theta \sim 35^\circ$. Разность между этими величинами соответствует углу рассеивания 7° . Представленные результаты по среднему углу рассеивания $\theta_{ср}$ в пленках лавсана справедливы также для бумаги, поскольку эффективные атомные номера этих материалов близки.

Полученные экспериментальные данные требуют выполнения следующих условий при коллимации рассеянного излучения на входе ионизационной камеры:

– радиус бета-«засветки» на входном окне не должен превышать 22 мм;

– для верхнего значения предела измерений 400 г/м^2 коллиматор должен быть прозрачным для прохождения излучения рассеянного в угол, немного превышающий его среднее значение ($30,8^\circ$) не более, чем на $3-4^\circ$.

Последнее условие препятствует чрезмерному ограничению потока частиц и, как следствие, неоправданному возрастанию случайной составляющей погрешности. Указанные условия реализованы в представленном ниже решетчатом коллиматоре (рисунок 4а). Решетка представляет собой круглую пластину толщиной 6 мм с набором плотно упакованных отверстий диаметром 4 мм, обеспечивающих угол коллимации 34° . Принцип действия коллиматора, обрезающего рассеянное излучение на больших углах, схематически показан на рисунке 4б.

Положительный эффект по снижению позиционной погрешности демонстрирует рисунок 5.

Экспериментальные данные получены при смещении каждой МПП от середины зазора на 3 мм. Максимальное значение позиционной погрешности для случая коллиматора и без него равны 0,3 и 1,5 г/м^2 соответственно. При этом случайная погрешность, связанная с уменьшением коллиматором потока излучения, возросла с 0,15 до 0,26 г/м^2 . Следует заметить, что при штатном использовании плотномеров в составе сканирующего устройства сдвиг полотна в измерительном зазоре нельзя предсказать.

В этой связи позиционная погрешность будет носить случайный характер, поэтому основную погрешность следует представить в виде:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{сист}^2 + \Delta_{случ}^2} \quad (12)$$

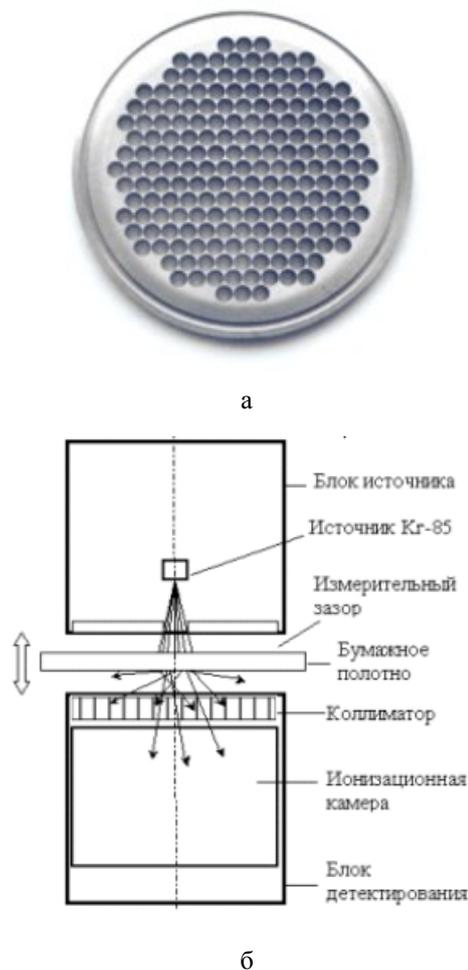


Рисунок 4 – Коллиматор (а) и блок-схема плотномер (б)

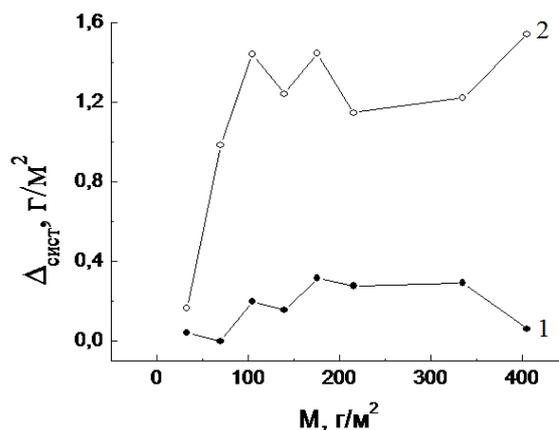


Рисунок 5 – Систематическая (позиционная) погрешность плотномеров с установленным коллиматором (1) и без него (2)

В соответствии с (12) применение коллиматора на входе ионизационной камеры снижает основную погрешность с 1,5 до 0,4 г/м^2 .

Заключение

Предложенная в работе методика позволяет оценить параметры ячейки решетчатого коллиматора в виде сот или отверстий в зависимости от диапазона измерений массы и уменьшить погрешность измерений радиоизотопного плотномера более чем в 3 раза. Отношение диаметра ячейки такого коллиматора к ее глубине должно обеспечивать угол со значением, превышающем средний угол рассеяния θ_{cp} на 3–4°.

Предлагаемая схема оценки углов рассеяния не требует применения дополнительной аппаратуры, и задача решается заменой штатного коллиматора в блоке излучателя на коллиматор, формирующий узкий пучок излучения.

Список использованных источников

1. *Vapirev, E.* Variations of the absorption coefficients in experiments with beta-particles / E. Vapirev, P. Grovez, N. Klasteva, T. Jordanov // *Bulgarian Journal of Physics.* – 1996. – Vol. 23, № 1/2. – P. 17–26.
2. Меры поверхностной плотности для радиоизотопных толщиномеров. Общие технические условия: ГОСТ 8.171-75. – Введ. 1977-01-01 – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 36 с.
3. *Mahajan, C. S.* Mass attenuation coefficients of beta particles in elements / C. S. Mahajan // *Science Research Reporter.* – 2012. – Vol. 2, № 2. – P. 135–141.

INCREASING OF ACCURACY FOR DENSITY MEASUREMENT MAKING BY A RADIOISOTOPIC BASIS WEIGHT SENSOR

Ermakovich O.L., Lisovsky G.A., Kuchynski P.V., Titovitsky I.A.

Research Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus
e-mail: ligeal@mail.ru

Abstract. The experimental investigations of spatial energy distribution for beta particles in a measuring gap of a basis weight sensor are described. We propose the measurement procedure, which employs a local domain of the ionization chamber input window. The average scattering angles in polyethylenterephthalate films are determined. Suggested technical solutions allow more than three times to reduce the error of measuring of radioisotope densitometer.

Keywords: beta-particles, basis weight sensor, measurement gap, polyethylenterephthalate (PETF).

References

1. Vapirev E., Grovez P., Klasteva N., Jordanov T. Variations of the absorption coefficients in experiments with beta-particles. *Bulgarian Journal of Physics*, 1996, vol. 23, № 1/2, pp. 17–26.
2. State system of ensuring the uniformity of measurements. Actual measures of the surface density for radiation thickness gauges. General specifications: GOST 8.171-75, Moscow, Standartinform Publ., 1975, 36 p. (In Russian).
3. Mahajan C. S. Mass attenuation coefficients of beta particles in elements. *Science Research Reporter*, 2012, vol. 2, № 2, pp. 135–141.

Поступила в редакцию 27.01.2015.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ТАНТАЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРЕСС-ТЕСТА

Кузнецов П.Л., Муравьев В.В.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
г. Ижевск, Российская Федерация
e-mail: pmkk@istu.ru

Рассматривается ускоренный способ анализа качества электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов на основе прогноза изменения эквивалентного последовательного сопротивления при проведении СТРЕСС-ТЕСТА.

Ключевые слова: танталовый конденсатор, емкость, эквивалентное сопротивление.

Введение

Одним из важнейших направлений в обеспечении коммутации источников питания, микропроцессоров и цифровых схем является достижение низких значений шумов при работе на высоких частотах. Чтобы реализовать это требование, необходимо применять компоненты с низким эквивалентным последовательным сопротивлением $R_{\text{эКВ}}$, в частности это распространяется и на конденсаторы.

До 2000-х годов в России основным параметром, характеризующим сопротивление конденсатора, являлось полное сопротивление конденсатора (импеданс) Z , т.е. сопротивление конденсатора переменному синусоидальному току определенной частоты, обусловленное наличием у реального конденсатора наряду с емкостью C также активного сопротивления и индуктивности. Следует отметить, что для конденсаторов, работающих при больших импульсных токах и на высокой частоте, например в фильтрах преобразователей, когда полное сопротивление конденсатора (импеданс) $Z \rightarrow R_{\text{эКВ}}$, требуется более объективная оценка качества. При этом изменения в десятые и даже сотые доли Ом могут иметь существенное значение, в связи с чем исследование параметра $R_{\text{эКВ}}$, представляется наиболее важным.

Изучению танталовых конденсаторов уделяется большое внимание [1, 2], так как данные конденсаторы обладают высокой надежностью.

Цикл исследований качества электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов в зависимости от качества материалов и технологии в процессе производства позволил повысить значение процента выхода годной продук-

ции [3–9]. Однако необходимо развивать ускоренные способы анализа качества электролитических танталовых конденсаторов.

Цель работы исследовать ускоренный способ анализа качества электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов на основе прогноза изменения эквивалентного последовательного сопротивления при проведении СТРЕСС-ТЕСТА.

Исходные положения

Полное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$Z = \sqrt{R_{\text{эКВ}}^2 + (X_C - X_L)^2}, \quad (1)$$

где $R_{\text{эКВ}}$ – эквивалентное последовательное (активное) сопротивление; X_C , X_L – реактивные составляющие (емкостная, индуктивная соответственно).

Значение $R_{\text{эКВ}}$ определяется тремя переменными [10]:

$$R_{\text{эКВ}} = R_0 + R_d + R_e, \quad (2)$$

где R_0 – константа, определяемая сопротивлением оксидной пленки и внутренних соединений; R_d – составляющая, зависящая от частоты:

$$R_d = \frac{D_{\text{ox}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \quad (3)$$

где D_{ox} – фактор диэлектрических потерь диэлектрика; f – частота.

Появление потерь, зависящих от частоты, обусловлено наличием тонкого слоя диэлектрика между обкладками.

Потери R_e зависят от температуры и определяются типом применяемого электролита [10]. Для оценки данной составляющей сопротивления применяют выражение:

$$R_e(T) = R_e(25^\circ\text{C}) \cdot 2^{\left[\frac{T-25}{A}\right]^B}, \quad (4)$$

где для электролитов на базе этиленгликоля постоянные $A = 40$; $B = 0,6$ [10]. В электролитических танталовых объемно-пористых конденсаторах контакт анодной пластины является прямым, так как основной металл анода – тантал, на котором термохимическим способом образуют оксидный слой, является диэлектриком (рисунок 1).

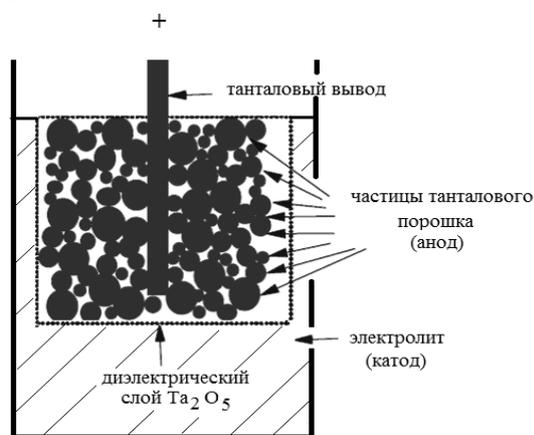


Рисунок 1 – Схематическое строение объемно-пористых танталовых конденсаторов

При изготовлении объемно-пористых конденсаторов невозможно получить абсолютную повторяемость параметров, а при появлении отклонений в технологических операциях эксплуатационные характеристики начинают изменяться во времени раньше расчетного срока.

Образцы для исследований и методика эксперимента

В качестве образцов для проведения исследований были взяты электролитические объемно-пористые танталовые конденсаторы, произведенные ОАО «Элеконд». Исследование экспериментальной партии электролитических объемно-пористых танталовых конденсаторов номиналом $35\text{ В} \times 100\text{ мкФ}$ с использованием СТРЕСС-ТЕСТА проведено на выборке $n = 30$ шт. Объем

такой выборки согласно [4] достаточен для проведения испытаний на длительную безотказность. Для объемно-пористых танталовых конденсаторов значение длительной безотказности может составлять до 40 000 ч.

Методика исследований на длительную безотказность включала следующие операции:

- измерения начальных значений параметров конденсаторов и в контрольных точках проводилось при температуре 20°C ;

- испытание конденсаторов при напряжении, равном номинальному $U_{исп} = 35\text{ В}$. Температура испытаний – максимальная температура среды, при которой допускается работа конденсаторов $T_{исп} = 85^\circ\text{C}$;

- продолжительность испытаний – 24000 ч [10];
- контрольные точки – 2000 ч; 3000 ч; 4000 ч; 6000 ч; 8000 ч; 10000 ч; 12 000 ч; 16000 ч; 19000 ч; 21000 ч; 24000 ч.

Для анализа взяты следующие эксплуатационные характеристики конденсаторов: емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц и эквивалентное последовательное сопротивление $R_{эКВ}$ (Ом) на частоте 100 кГц.

Методика проведения СТРЕСС-ТЕСТА включала следующие операции:

1. Проведение измерения начальных значений параметров конденсаторов при температуре 20°C .

2. Проведение 10 циклов испытаний при напряжении равном $1,8 U_{ном} = U_{исп} = 63\text{ В}$ и температуре 20°C . Напряжение, при котором проводился СТРЕСС-ТЕСТ, соответствует напряжению формовки анода конденсатора и имитирует эту операцию, но уже при собранном в корпус конденсаторе.

3. Продолжительность каждого цикла – 5 мин.

4. Контроль параметров:
 - емкость конденсаторов C (мкФ) на частоте 50 Гц;
 - эквивалентное последовательное сопротивление $R_{эКВ}$ (Ом) на частоте 100 кГц;
 - температура поверхности конденсатора T_k .

Результаты и их обсуждение

При проведении испытаний на длительную безотказность получены зависимости изменения значений емкости и эквивалентного последовательного сопротивления, представленные на рисунках 2 и 3. Соединив точки верхних и нижних границ полей рассеяния, получим временные функции изменения емкости (рисунок 2).

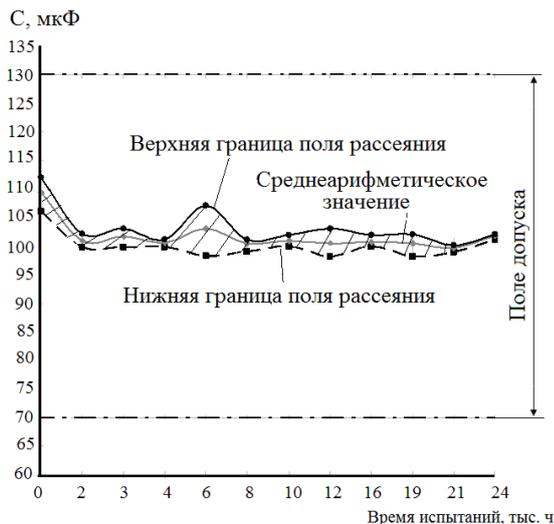


Рисунок 2 – График зависимости разброса емкости конденсаторов от времени эксплуатации

Из зависимости видно, что за все время эксперимента не произошло выхода границы поля рассеивания емкости за границы поля допуска (70–130 мкФ). К 2000 ч эксплуатации наблюдается снижение значений параметра C , а затем к 6000 ч эксплуатации наблюдается некоторое увеличение емкости, что, возможно, связано с подформовкой анода. После 6000 ч эксплуатации вновь наблюдается небольшое снижение емкости и с 8000 ч емкость стабилизируется.

Из анализа временной зависимости эквивалентного последовательного сопротивления, приведенной на рисунке 3, следует, что до 21000 ч наблюдаются стабильные значения $R_{\text{экв}}$ с небольшим увеличением в контрольной точке 8000 ч, затем с 21000 ч наблюдается резкое увеличение в контрольной точке 24000 ч (максимальное значение $R_{\text{экв}}$ возросло с 0,2 до 1,2 Ом), что можно считать браковочным признаком.

Анализируя характеры зависимостей емкости конденсаторов C и их эквивалентного последовательного сопротивления $R_{\text{экв}}$ (рисунки 2 и 3) от времени эксплуатации, можно сделать следующие выводы: отказ по параметру $R_{\text{экв}}$ наблюдается с 21000 ч, даже с учетом ошибок технологических операций, приводящих к завышенным значениям C (что не является браковочным признаком и в дальнейшем дает ложноположительный результат при контроле параметров при проведении испытаний на длительную безотказность), отказ же по параметру C не происходит даже после 24000 ч эксплуатации.

Таким образом, анализ этого выходного параметра технологического процесса позво-

ляет спрогнозировать момент выхода границы поля рассеивания за границы поля допуска и заблаговременно определить момент появления бракованных изделий, анализируя не основной параметр C , а справочный параметр $R_{\text{экв}}$.

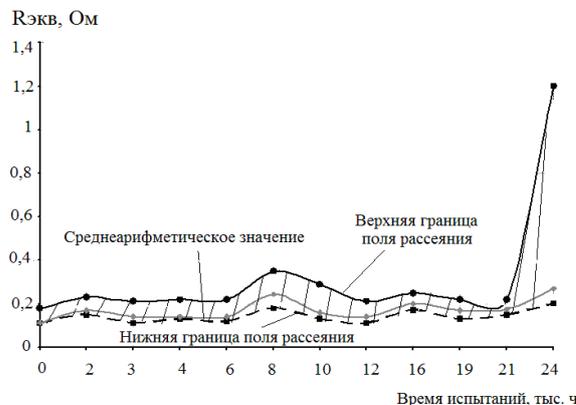


Рисунок 3 – График зависимости разброса эквивалентного последовательного сопротивления конденсаторов $R_{\text{экв}}$ от времени эксплуатации

Для ускоренной оценки качества конденсаторов был проведен СТРЕСС-ТЕСТ. На рисунках 4 и 5 представлены характеры изменения емкости и эквивалентного последовательного сопротивления конденсаторов при проведении СТРЕСС-ТЕСТА.

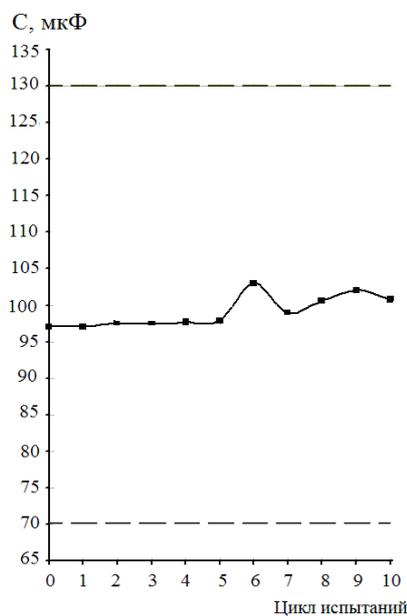


Рисунок 4 – Характер изменения емкости C объемно-пористых конденсаторов номиналом 35 В × 100 мкФ при проведении СТРЕСС-ТЕСТА

В ходе проведения СТРЕСС-ТЕСТА в цикле 6 наблюдается увеличение емкости, а затем ем-

кость вновь стабилизируется. Тогда как эквивалентное последовательное сопротивление до 7 цикла испытаний стабильно, с 7 по 9 цикл данный параметр снижается, а уже с 9 цикла происходит резкое его увеличение – с 0,19 до 0,35 Ом, что можно считать браковочным признаком.

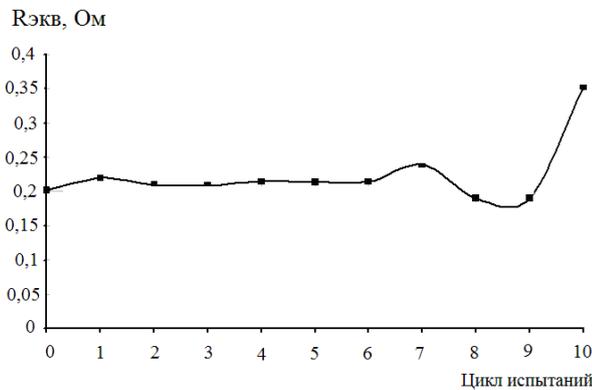


Рисунок 5 – Характер изменения $R_{экв}$ конденсаторов номиналом 35 В×100 мкФ при проведении СТРЕСС-ТЕСТА

По характеру изменения $R_{экв}$ в ходе испытаний, можно сделать вывод, что в дальнейшем при использовании его на высоких частотах, произойдет дальнейшее увеличение сопротивления, что приведет к преждевременному выходу из строя и разрушению, тогда как по параметру C это не наблюдается.

Заключение

Анализ выходных параметров технологического процесса позволяет заблаговременно определить момент появления бракованных изделий не по основному параметру конденсатора – емкости C , а по справочному параметру – эквивалентному последовательному сопротивлению $R_{экв}$, что является важным при проведении ускоренных испытаний.

Список использованной литературы

1. *Fritzler, T.* Scintillation Conditioning of Tantalum Capacitors With Manganese Dioxide Cathodes, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability (Impact Factor: 1.54) / T. Fritzler, M.H. Azarian, M.G. Pecht. – 01/2014; 14(2):630-638. DOI: 10.1109/TDMR.2014.2314731.
2. *Franco, F. Di.* Characterization of the Solid State Properties of Anodic Oxides on Magnetron Sput-

tered Ta, Nb and Ta-Nb Alloys / F. Di Franco [et al.] // Journal of The Electrochemical Society. – 2012.– Vol. 159(1). – P. 33–39.

3. *Кузнецова, В.А.* Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных / В.А. Кузнецова, П.Л. Кузнецов, В.В. Муравьев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 88–91.
4. *Кузнецов, П.Л.* Исследование влияния характеристик технологического процесса изготовления на изменения эксплуатационных характеристик танталовых объемно-пористых конденсаторов во времени / П.Л. Кузнецов, В.А. Кузнецова, Г.В. Ломаев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2014. – № 1. – С. 11–15.
5. *Кузнецова, В.А.* Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В.А. Кузнецова [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 140–143.
6. *Беляева, Е.А.* Исследование влияния срока сохраняемости на эксплуатационные характеристики и состояние объемно-пористых танталовых конденсаторов / Е.А. Беляева, В.А. Кузнецова, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1. – С. 96–99.
7. *Беляева, Е.А.* Влияние переменной синусоидальной составляющей пульсирующего напряжения при оксидировании объемно-пористых анодов танталовых конденсаторов на электрические параметры / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2. – С. 96–102.
8. *Кузнецова, В.А.* Влияние качества корпуса оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов на эксплуатационные параметры / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2. – С. 112–115.
9. *Кузнецова, В.А.* Влияние конструктивных характеристик анода на эксплуатационные параметры оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов / Е.А. Беляева, В.В. Муравьев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 105–107.
10. *Радюшкин, О.* Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов / О. Радюшкин. – Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 19–22.

**THE QUALITY CONTROL OF ELECTROLYTIC TANTALUM CAPACITORS
BY USING THE STRESS TEST**

Kuznetsov P.L., Muraviev V.V.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
e-mail: pmkk@istu.ru

Abstract. the article discusses the accelerated method of analysis the electrolytic tantalum capacitors quality on the basis of the change equivalent series resistance forecast while conducting the STRESS TEST.

Keywords: tantalum capacitor, capacitance, equivalent resistance.

References

1. T. Fritzler, M.H. Azarian, M.G. Pecht. Scintillation Conditioning of Tantalum Capacitors With Manganese Dioxide Cathodes, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* (Impact Factor: 1.54). 01/2014; 14(2):630-638. DOI: 10.1109/TDMR.2014.2314731.
2. F. Di Franco, G. Zampardi, M. Santamaria, F. Di Quarto, and H. Habazaki. Characterization of the Solid State Properties of Anodic Oxides on Magnetron Sputtered Ta, Nb and Ta-Nb Alloys, *Journal of The Electrochemical Society*, 2012, vol. 159(1), pp. 33–39.
3. Kuznecova V.A., Kuznecov P.L., Muraviev V.V. Investigation of the reliability of tantalum chip capacitors on the basis of experimental data. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 88–91 (in Russian).
4. Kuznecov P.L., Kuznecova V.A., Lomaev G.V. Research of influence of characteristics of technological process of production on changes of operational characteristics of tantalum wet capacitors in time. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 1, pp. 11–15 (in Russian).
5. Kuznecova V.A., Kuznecov P.L., Belyaeva E.A., Muraviev V.V. Investigation of the influence on the performance quality of the materials tantalum chip capacitors. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 2, pp. 140–143 (in Russian).
6. Belyaeva E.A., Kuznecova V.A., Muraviev V.V. Investigation of the influence of storage time on the performance and status of the tantalum capacitors. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 1, pp. 96–99 (in Russian).
7. Belyaeva E.A., Muraviev V.V. The influence of variable sinusoidal component of the pulsating voltage when the oxidation of the space-porous anodes of tantalum capacitors for electrical parameters. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 2, pp. 96–102 (in Russian).
8. Kuznecova V.A., Muraviev V.V. The influence of the quality of the case tantalum chip capacitors on operating parameters. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no. 2, pp. 112–115 (in Russian).
9. Kuznecova V.A., Muraviev V.V. The influence of structural characteristics of the anode on the operational parameters of the tantalum chip capacitors. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 4, pp. 105–107 (in Russian).
10. Radyushkin O. Methods of estimating period of exploitation of electrolytic capacitors. *Silovaya elektronika*, 2010, no. 5, pp. 19–22 (in Russian).

Поступила в редакцию 26.01.2015.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ Mo-Ti-N И Mo-Cu-N ПОКРЫТИЙ НА УСТАНОВКЕ «СКРЕТЧ-ТЕСТЕР»

Анищик В.М.¹, Кулешов А.К.¹, Узлов В.В.¹, Русальский Д.П.¹, Сыщенко А.Ф.²

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ЗАО «БМЦ», г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: rusalsky@bsu.by

Разработана установка («скретч-тестер») для определения адгезионной прочности покрытий. Установка имеет ряд преимуществ по сравнению с известными аналогами – расширенный диапазон размеров исследуемого образца и более простая процедура его позиционирования, более точное измерение длины скрайбирования, дополнительный способ регистрации момента разрушения или отрыва покрытия по силе трения. Установка использована для исследования покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N на твердосплавных пластинах, и установлено, что покрытия Mo-Ti-N имеют в пять раз большую адгезионную прочность, чем покрытия Mo-Cu-N.

Ключевые слова: установка «скретч-тестер», адгезионная прочность, покрытия Mo-Ti-N и Mo-Cu-N, твердосплавные пластины.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили различные методы нанесения покрытий, а наиболее важным для практического применения является такое свойство покрытий, как прочность их сцепления с матрицей – адгезия. В связи с этим необходимо развитие методов и приборов («скретч-тестеры»), которые могли бы контролировать адгезию, однако в СНГ эта проблематика исследована недостаточно.

Принцип работы «скретч-тестеров» основан на известном методе склерометрии (испытание царапанием). Этот метод основан на контролируемом царапании индентором на выбранном участке образца. Наконечник индентора (обычно алмаз или карбид вольфрама) перемещается по поверхности образца с возрастающей нагрузкой. При определенной критической нагрузке покрытие начинает разрушаться [1]. Величина этой нагрузки является характеристикой адгезионной прочности.

В настоящей работе представлена разработанная установка «скретч-тестер» для определения адгезионной прочности покрытий, имеющая расширенный диапазон размеров исследуемого образца, а также более точное измерение длины скрайбирования и дополнительный способ регистрации момента разру-

шения или отрыва покрытия по силе трения по сравнению с известными аналогами.

Приведены также результаты использования разработанной установки для тестирования покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N на твердосплавных пластинах.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1) *Установка для определения адгезионной прочности покрытий «скретч-тестер»*

Установка состоит из столика с держателем образца и датчиком акустической эмиссии, блока перемещения столика с датчиком перемещения и датчиком измерения силы трения, индентора, блока нагружения с датчиком измерения нагрузки, блока оптической регистрации с микроскопом и видеокамерой, блока управления, обработки и передачи данных на ПЭВМ.

В прибор заложен следующий принцип работы. На столике держателя образца закрепляется исследуемый образец с покрытием и на его поверхность устанавливается индентор. По команде блока управления шаговый двигатель нагружения начинает по заданному алгоритму увеличивать давление на датчик силы и через

него на индентор. Одновременно второй шаговый двигатель начинает с заданной скоростью перемещать столик держателя образца через второй датчик силы, который регистрирует возникающую силу трения. Также со столиком держателя образцов связан датчик перемещения. В процессе теста управляющий блок осуществляет прием данных от датчиков силы, датчика перемещения и от акустического датчика, прикрепленного к держателю образца. По окончании теста существует возможность изучить царапину на покрытии при помощи микроскопа с видеокамерой.

В отличие от известного прибора для определения адгезионной прочности [2], в котором нагружение на индентор шаговым двигателем происходит через коромысло с датчиком силы, в «скретч-тестере» весь блок нагружения расположен вертикально. Такая схема расположения менее требовательна к размерам исследуемого образца по высоте и позволяет упростить процедуру начального позиционирования индентора на его поверхность. Использование датчика перемещения позволяет более точно определять длину скрайбирования по сравнению со счетом шагов шагового двигателя. Кроме того, использование дополнительного датчика силы для измерения силы трения в блоке перемещения дает дополнительную возможность (наряду с акустической эмиссией) регистрации момента разрушения или отрыва покрытия по динамике изменения коэффициента трения в процессе теста.

Скретч-тестер обладает следующими основными характеристиками: нагружение индентора до нагрузки 200 Н с разрешением 5 мН; регистрация силы трения при царапании с разрешением 5 мН; измерение перемещения образца с разрешением 0,5 мкм; скорость царапания от 0,4 до 100 мм/мин; регистрация сигнала акустического датчика; анализ изображения царапины при помощи микроскопа с видеокамерой.

Фотография царапин, выполненных при тестировании скретч-тестера, представлена на рисунке 1.

Для управления скретч-тестером при помощи ПЭВМ разработано программное обеспечение, которое выполняет следующие основные функции: обмен данными и управление шаговыми двигателями перемещения образца и нагружения; получение данных от датчиков силы, перемещения и акустического датчика; отобража-

ние полученных данных на графике в реальном времени и сохранение данные в файлах; получение и отображение видеоизображения поверхности образца; проведение выбора режимов опыта, калибровки датчиков и отладки работы прибора.

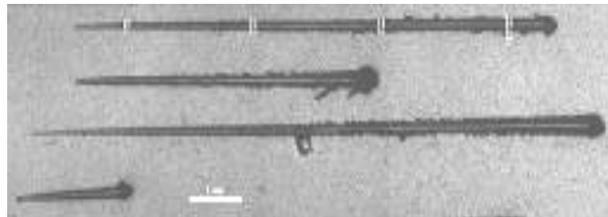
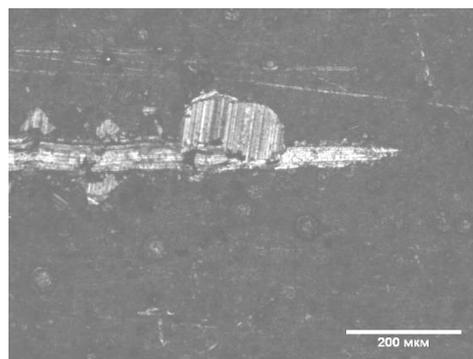


Рисунок 1 – Фотография царапин, выполненных при тестировании скретч-тестера

На рисунке 2 представлены результаты тестирования скретч-тестера на образце ножа из твердого сплава с покрытием ZrN/Cu. Установлено, что адгезионная прочность – нагрузка, при которой происходит отрыв покрытия при скрайбировании, такой системы составляет около 7,2 Н.



а

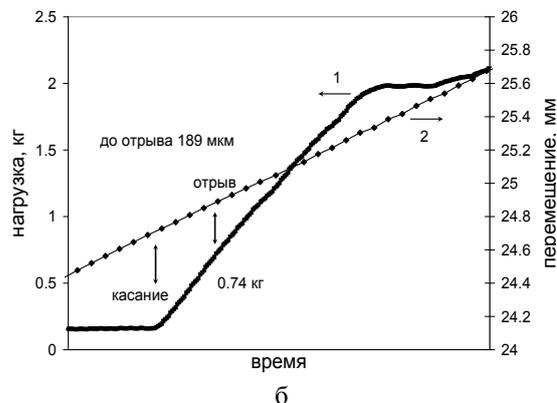


Рисунок 2 – Результаты тестирования скретч-тестера на образце ножа из твердого сплава с покрытием ZrN/Cu 3 мкм: а – фотография царапины; б – графики нагружения (1) и перемещения (2) (также отмечены моменты касания и отрыва)

2) Исследования покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N на твердосплавных ножках

Объектами исследования являлись образцы твердого сплава в виде ножей для фрезерного деревообрабатывающего инструмента, состоящие из карбида WC и связующего Co (3 ат. %) твердостью 18 ГПа.

Осаждение нитридных молибден-титановых (Mo-Ti-N) и молибден-медных (Mo-Cu-N) покрытий на образцы твердого сплава проводилось методом конденсации с ионной бомбардировкой при одновременном горении дуг двух катодов: Mo и Ti в первом случае и Mo и Cu во втором. Толщина покрытий составила 2–3 мкм. Режимы осаждения указаны в таблице 1.

Таблица 1

Режимы осаждения покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N

Образец	Материалы катодов	Ток дуги катодов, А	Давление азота, Па	Напряжение смещения, В	Время осаждения, мин
MoTiN1	Mo/Ti	210/70	10 ⁻¹	120	10
MoTiN2		190/80			
MoCuN1	Mo/Cu	190/80			
MoCuN2		190/120			

Фазовый состав покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа при помощи дифрактометра *Ultima IV* в CuK_α излучении при скользшем падении рентгеновских лучей в 5°. Микротвердость поверхностных слоев измерялась методом Кнуппа на приборе *Wilson Instruments 402MVD* (нагрузка 0,25 Н, глубина индентирования 0,3–0,4 мкм). Измерение адгезионной прочности образцов с покрытиями проводилось на установке «скретч-тестер».

Анализ дифрактограмм Mo-Ti-N покрытий (рисунок 3а) показал, что дифракционные рефлексы покрытий близки к табличным значе-

ниями нитрида титана TiN с небольшим сдвигом (до 0,5°) в область меньших дифракционных углов. Дифракционные рефлексы молибдена или нитрида молибдена на дифрактограмме не наблюдались.

Известно, что атомный радиус молибдена в 1,2 раза больше титанового, поэтому замещение титана молибденом в решетке TiN приводит к увеличению параметра решетки TiN и сдвигу дифракционных рефлексов в область меньших дифракционных углов, т.е. сформированные покрытия представляют собой твердый раствор замещения в решетке TiN атомов титана молибденом – (Mo,Ti)N.

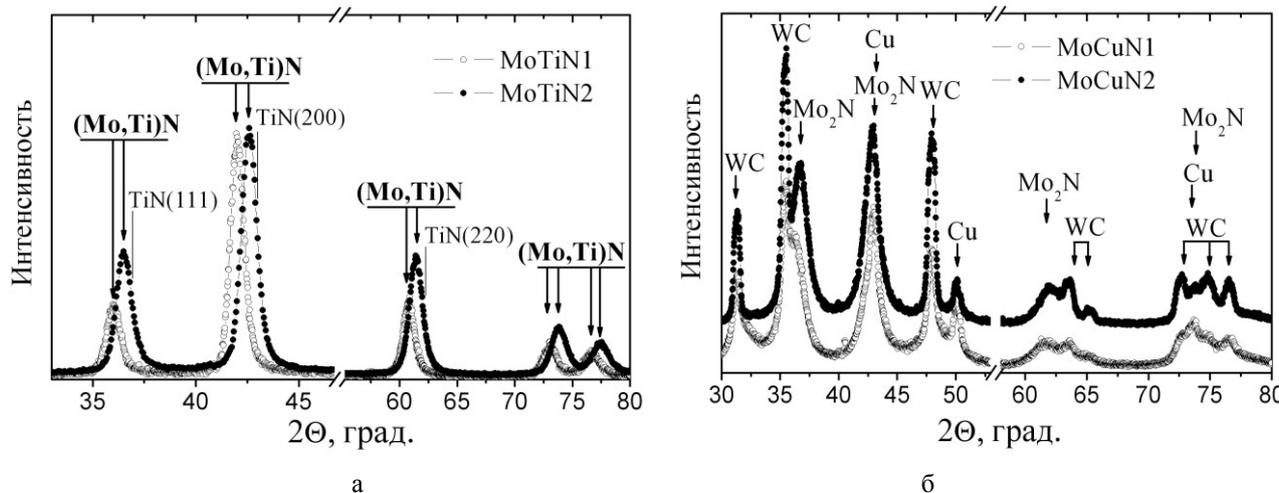


Рисунок 3 – Рентгенограммы образцов: а – покрытия Mo-Ti-N; б – покрытия Mo-Cu-N

Если бы образовался твердый раствор (Mo,Ti)N в результате замещения атомов молибдена титаном в гексагональной структуре MoN, то он должен был бы иметь гексагональную структуру, в отличие от экспериментально полученной кубической структуры синтезированного покрытия. При увеличении отношения силы тока дуг катодов молибдена и титана от 2 до 3 относительное содержание молибдена в покрытиях возрастает с 64 до 74 ат. %, а титана – уменьшается с 36 до 26 ат. % соответственно.

На дифрактограммах Mo-Cu-N покрытий (рисунок 3б) помимо рефлексов карбида вольфрама WC из подложки имеются дифракционные рефлексы нитрида молибдена Mo₂N и меди. Наблюдается сдвиг (до 1°) экспериментальных дифракционных рефлексов относительно табличных значений для Mo₂N в область меньших дифракционных углов. Учитывая, что образование нитридных фаз меди не произошло, а медь не растворяется в Mo₂N, можно предположить, что этот сдвиг обусловлен превышением стехиометрической концентрации азота в Mo₂N. Результаты микроанализа показали, что относительное содержание в покрытиях MoCuN1 и MoCuN1 молибдена составляет 70 и 62 ат. %, а меди – 30 и 38 ат. % соответственно.

Микроструктура Mo-Ti-N и Mo-Cu-N покрытий различна (рисунок 4). Для Mo-Ti-N покрытия характерна значительно более дисперсная разупорядоченная микроструктура.

Увеличение на фотографии позволяет различать структурированные объекты в микроструктуре с размером не менее 50 нм, однако они не были выявлены. Покрытия Mo-Cu-N имеют выраженную столбчатую структуру в перпендикулярном направлении с поперечным размером столбчатых образований в среднем 0,1 мкм.

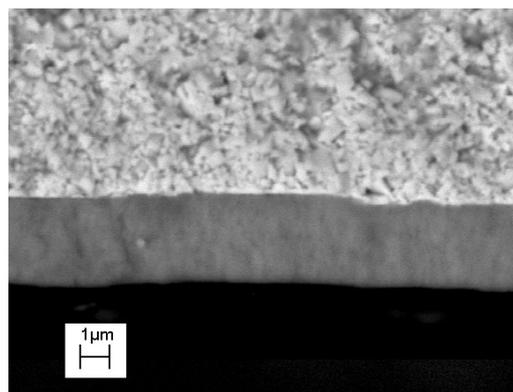
Твердость покрытий Mo-Ti-N превышает твердость Mo-Cu-N покрытий (таблица 2). Из таблицы следует, что Mo-Ti-N покрытия обладают твердостью большей (до 40 ГПа), чем твердость известных нитридных покрытий, используемых коммерчески в промышленности, обладающих в том числе и наноразмерной структурой, таких как TiAlN, (TiCrAlY)N, TiCN и других, максимальное значение твердости которых находится в интервале 28–34 ГПа [3]. Результаты адгезионных испытаний (таблица 2 и рисунок 5) показали, что адгезионная прочность покрытий Mo-Ti-N составляет порядка 22 Н, а

покрытий Mo-Cu-N – 4 Н. Такое отличие механических свойств покрытий объясняется их различной структурой – твердый раствор (Mo,Ti)N на базе нитрида титана TiN с повышенными механическими свойствами в первом случае и смесь нитрида молибдена Mo₂N и свободной меди во втором.

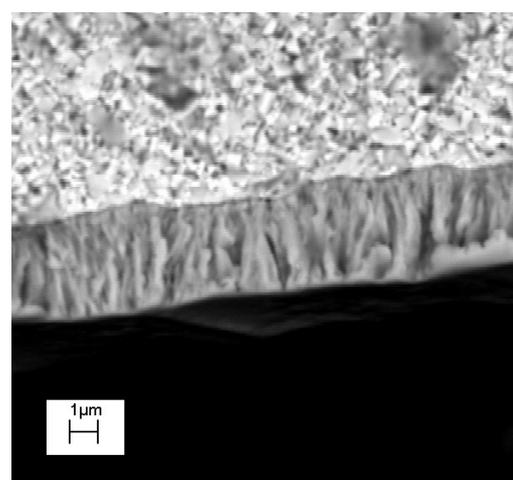
Таблица 2

Механические свойства покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N

Образец	Твердость, ГПа	Адгезионная прочность, Н
MoTiN1	40 ± 2	22
MoTiN2	34 ± 2	20
MoCuN1	22 ± 1	4
MoCuN2	28 ± 1	4



а



б

Рисунок 4 – СЭМ-фотографии изломов твердосплавных ножей с покрытиями: а – покрытие MoTiN1; б – покрытие MoCuN1

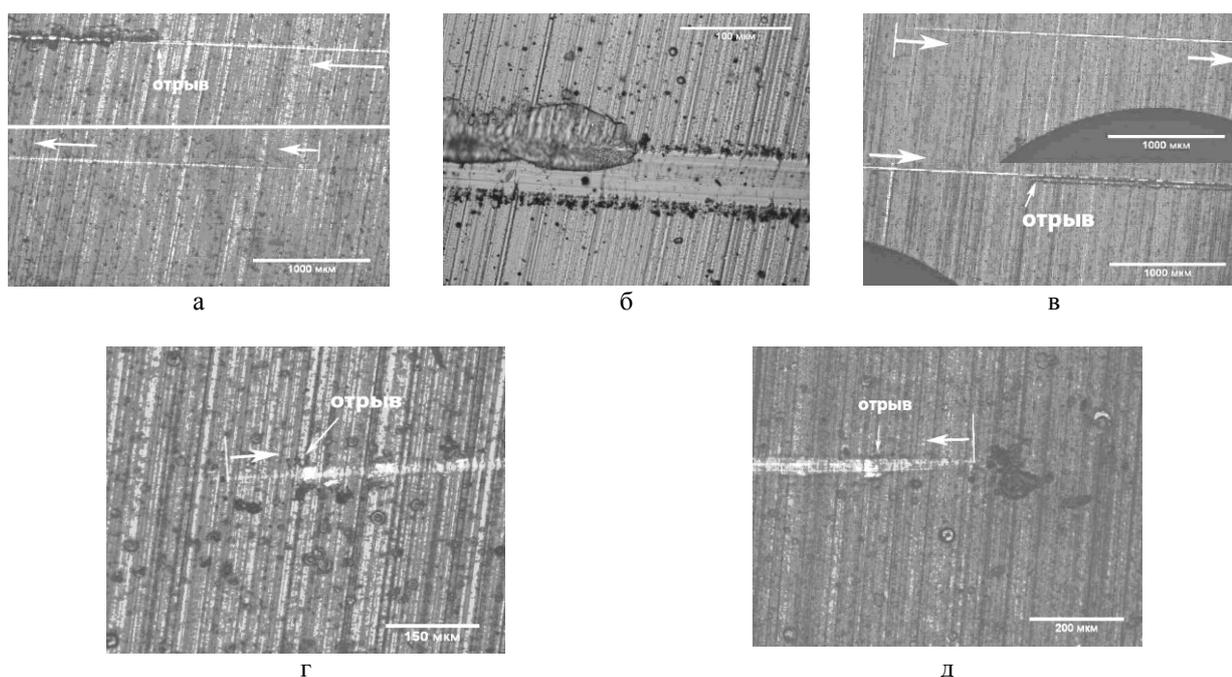


Рисунок 5 – Оптические фотографии царапин после адгезионных испытаний образцов с покрытиями: а – MoTiN1; б – увеличенное место отрыва покрытия MoTiN1; в – MoTiN2; г – MoCuN1; д – MoCuN2

Заключение

Разработана установка «скретч-тестер» для определения адгезионной прочности покрытий, имеющая ряд преимуществ по сравнению с известными аналогами – расширенный диапазон размеров исследуемого образца и более простая процедура его позиционирования, более точное измерение длины скрайбирования, дополнительный способ регистрации момента разрушения или отрыва покрытия по силе трения.

Основные технические характеристики установки следующие: нагружение индентора при скрайбировании до нагрузки 200 Н с разрешением по нагрузке и силе трения 5 мН и с разрешением по перемещению образца 0,5 мкм.

Установка использована для исследования покрытий Mo-Ti-N и Mo-Cu-N на твердосплавных пластинах. Установлено, что механические свойства покрытий Mo-Ti-N (твердость до 40 ГПа, адгезионная прочность до 22 Н) значительно лучше, чем у покрытий Mo-Cu-N (твер-

дость до 22 ГПа, адгезионная прочность не более 4 Н). Это связано с формируемой структурой покрытий – твердый раствор (Mo,Ti)N на базе нитрида титана TiN с повышенными механическими свойствами в первом случае и смесь нитрида молибдена Mo₂N и свободной меди во втором.

Список использованных источников

1. TiN coating adhesion studies using the scratch test method / Valli J. // Journal of Vacuum Science and Technology A3. – 1985. – № 6. – P. 2411–2414.
2. Устройство для измерения адгезионной прочности покрытия : патент ВУ 6468 от 30.08.2010 / М.А. Андреев, Е.П. Макаревич, А.Н. Суворов, А.Н. Мойсейчик, Л.В. Маркова, Т.А. Кузнецова.
3. Береснев, В.М. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / В.М. Береснев [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – № 1–2. – С. 4–27.

MEASUREMENT OF ADHESION STRENGTH OF Mo-Ti-N AND Mo-Cu-N COATINGS USING «SCRATCH-TESTER» DEVICE

Anischik V.M.¹, Kuleshov A.K.¹, Uglov V.V.¹, Rusalsky D.P.¹, Syschenko A.F.²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²JSC «BMC», Minsk, Belarus

Abstract. The new «scratch-tester» device for measurement of adhesion strength of coatings is presented. The device has a number of advantages as compared with known analogues – the expanded range of investigated sample sizes and more simple procedure of sample positioning, more precise measurement of scratching length, additional manner of registration of coating destruction or tearing off instant on the base of friction force. The device was used for investigation of Mo-Ti-N and Mo-Cu-N coatings on carbide cutting insert. It was found that Mo-Ti-N coatings have five times greater adhesion strength as compared with Mo-Cu-N coatings.

Keywords: «scratch-tester» device, adhesion strength, Mo-Ti-N and Mo-Cu-N coatings, carbide cutting insert.

References

1. Valli J. TiN coating adhesion studies using the scratch test method. *Journal of Vacuum Science and Technology A3*, 1985, no 6, pp. 2411–2414.
2. Andreev M.A., Makarevich E.P., Suvorov A.N., Mojseljchik A.N., Markova L.V., Kuznetsova T.A. *Ustrojstvo dlya izmereniya adgezionnoj prochnosti pokrytiya* [The device for measurement of adhesion strength of coating]. Patent BY, no. 6468, 2010.
3. Beresnev V.M., Pogrebnyak A.D., Azarenkov N.A., Farenik V.I., Kirik G.B. [Nanocrystalline and nanocomposite coatings, structure, properties]. *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*, 2007, vol. 5, no 1–2, pp. 4–27 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.01.2015.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОШКОВ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ

Черненко А.С.¹, Контуш С.М.¹, Зинченко А.С.², Калинин В.В.¹, Калугин В.В.³

¹Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, г. Одесса, Украина

²ПАО Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича, г. Мариуполь, Украина

³Физико-химический институт защиты окружающей среды и человека, г. Одесса, Украина
e-mail: chernalex@ukr.net

Описана методика определения гранулометрического состава сухих порошков теневым методом в автоматизированной системе определения дисперсности. Проведен дисперсный анализ частиц пылеугольного топлива. Сравнение с результатами цифровой микроскопии позволило установить ряд преимуществ используемой методики.

Ключевые слова: дисперсность, распределение, размер, порошок, цифровая микроскопия.

Введение

Технологические порошки различных веществ находят широкое применение в современной металлургии. Свойства порошков сильно зависят от размеров частиц. Соответственно весьма актуальной является задача измерения размеров частиц в порошках и функции распределения частиц по размерам. Классическим (прямым) методом проведения таких измерений является дисперсный микроскопический анализ, когда частицы порошка наносятся на прозрачную подложку (предметное стекло) и их размер определяется с помощью окулярной сетки подходящего микроскопа. Если необходимо определить функцию распределения частиц по размерам, проводятся измерения размеров большого числа частиц, и затем строится дифференциальная или интегральная кривая распределения частиц по размерам [1, 2]. Путем использования видеокамеры (цифрового фотоаппарата), присоединенной к окуляру микроскопа и подключенной к ЭВМ при наличии необходимого пакета программ резко увеличивается скорость микроскопического анализа.

Определение дисперсности пылеугольного топлива возможно с помощью распространенных на рынке лазерных счетчиков, например анализаторов фирм *Fritsch* и *Retsch*. В этих приборах регистрируется интенсивность света, рассеянного отдельными частицами и по амплитуде возникающих электрических импульсов опреде-

ляют размер частиц [3]. Такой методический подход известен как SPOS-метод – single particle optical sizing (оптический метод измерения размеров отдельных частиц). Здесь существуют определенные трудности. Во-первых, достаточно трудно перевести порцию порошка в аэрозольное состояние; во-вторых, частицы разной природы рассеивают свет по-разному из-за разницы в коэффициентах преломления света разными веществами. Главной особенностью большинства из них является одновременное представление счётной концентрации частиц в 3–6 размерных диапазонах, ширина которых довольно часто различаются по величине.

В данной работе используется принципиально иной лазерный теневой счетчик аэрозольных частиц АСОД-300 (автоматизированная система определения дисперсности), принцип работы которой сходен с имеющимися зарубежными аналогами [4]. Одним из преимуществ АСОД-300 является меньшая в несколько раз цена в сравнении с зарубежными аналогами [4]. Определение дисперсного состава твердых сыпучих порошков разной природы возможно как в автономном режиме, так и под управлением персонального компьютера при помощи прилагаемого программного обеспечения. Рабочие условия АСОД-300 лежат в пределах температур окружающей среды от +5 до +35 °С, относительной влажности от 60 до 80 %, атмосферного давления от 0,86 до 1,06 атм.

Целью данной работы являлась разработка методики определения дисперсности порошка пылеугольного топлива, вдуваемого в доменные печи, с помощью автоматизированной системы определения дисперсности и сравнение с результатами методом цифровой микроскопии.

Устройство и принцип действия автоматизированной системы определения дисперсности

В применяемой автоматизированной системе определения дисперсности порошков производится прямое измерение размеров частиц по их тени, которая образуется при пересечении частицей тонкого светового (например, лазерного) луча (рисунок 1).

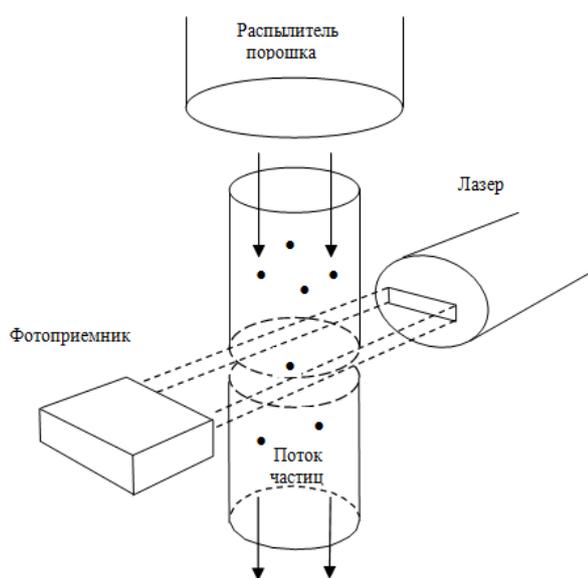


Рисунок 1 – Принципиальная схема измерений размеров частиц теневым методом

Ее использование позволяет определять дисперсность порошков, предварительно переводя порошок во взвешенное состояние, в диапазоне размеров от 5 до 300 мкм в виде гистограммы с шагом в 3 мкм. Именно частицы этого диапазона получают в валковой мельнице пылеугольного комплекса.

Схема измерительного блока системы приведена на рисунке 1. Он состоит из двух основных частей – фотоэлектрической ячейки измерения размеров частиц и дозатора-распылителя порошка. В фотоэлектрической ячейке диодный лазер создает плоский луч света, пересекающий поток воздуха с частицами. Этот поток света падает на фотоприемник (фотодиод), который

генерирует некоторую постоянную разность потенциалов. При пересечении одной частицей лазерного луча освещенность фотоприемника падает, и на входе регистрирующей схемы возникает короткий отрицательный импульс (рисунок 2). Если толщина светового луча больше диаметра частицы, то амплитуда этого импульса будет пропорциональна проекционному размеру частицы. В другом случае, когда размер частицы больше толщины луча, размер частицы можно определить по длительности отрицательного импульса освещенности (если принять скорость движения частицы постоянной).

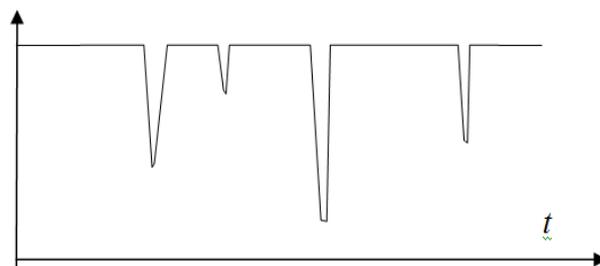


Рисунок 2 – Импульсные сигналы на фотоприемнике

Преимуществом данного метода является то, что при стабильной освещенности фотоприемника и известном сечении луча света величина уменьшения уровня сигнала дает напрямую информацию о размере частицы. Поэтому в отличие от других методов измерений система не требует калибровки, т.е. не требуется проверка ее работы с помощью порошков с известным распределением частиц по размерам.

Частицы порошка вводятся в фотоэлектрическую ячейку специальным распылителем-дозатором, который установлен над этой ячейкой. В нем из небольшой порции порошка с помощью центробежного устройства образуется аэрозоль, в которой полностью разрушены агрегаты частиц. Параметры распылителя выбраны таким образом, что счетная концентрация частиц в аэрозоли невелика. Как правило, при движении аэрозоли через фотоэлектрическую ячейку, пересекают световой луч лишь одиночные частицы. Вероятность одновременного пересечения луча двумя и более частицами пренебрежимо мала. Работа распылителя предусматривает возрастание скорости вращения центробежного устройства с целью отрыва от лопастей частиц более мелких фракций.

Блок дезагрегации и измерительный блок связываются друг с другом таким образом, что

выход дезагрегатора и вход измерительного блока соосны. Режим работы распылителя и измерительного блока задан так, что аэрозольное облако втягивается в счетный объем без искажений дисперсного состава пробы, что обеспечивает ее репрезентативность.

Приемный контейнер служит для сбора частиц порошка, проходящих измерительный блок при измерении или очистке. Наряду с фотоэлектрической ячейкой и распылителем-дозатором, система содержит электронный блок, регистрирующий сигналы от фотоприемника, и блок обработки электрических импульсов.

Полученные результаты в виде таблиц и гистограмм обновляются в процессе работы автоматизированной системы определения дисперсности и представляются на встроенном экране. Прилагаемое программное обеспечение позволяет, используя внешний компьютер, определить дифференциальную и интегральную функции распределения, средний размер и ряд других характеристик порошка. Это дает ряд преимуществ:

- более наглядное представление результатов измерений;
- сохранение и загрузка результатов в электронном виде с возможностью дальнейшей распечатки;
- проведение составных замеров с увеличением объема измеряемого образца;
- настройка параметров системы: числа измеряемых частиц (по умолчанию до 20000), нижнего и верхнего предела отображаемой шкалы в микрометрах, режима обновления гистограммы в онлайн-режиме через заданное значение числа измеряемых частиц, точности шкалы в мкм и др.

Основные параметры АСОД-300 представлены в таблице 1.

Получение отчета занимает для большинства случаев около 5 мин, для чего необходимо иметь небольшую порцию (до 500 мг) порошка. Он содержит общее число частиц трех эквивалентных размеров, характеризующих долю частиц в 10, 50 и 90 % меньших данного, а также гистограмму в графическом и табличном виде. В качестве примера (рисунок 3) представлен результат проведения дисперсного анализа для монодисперсного порошка диаметром 23 мкм, что показывает незначительную ($23,2 \pm 0,8$ мкм) погрешность результатов АСОД-300.

Таблица

Технические характеристики АСОД-300

Напряжение питания, В	220
Потребляемая мощность, Вт	45
Диапазон измеряемых частиц, мкм	5–300
Относительная погрешность измерения размеров во всем диапазоне	5 %
Погрешность получения распределения по размерам	10 %
Количество загружаемой пробы, мм ³	10–50
Время получения результата, мин	5–20
Регистрируемый параметр	эквивалентный диаметр
Вес измерительного блока, кг	6,6
Вес блока дезагрегации, кг	1,6
Габариты, мм	330 × 260 × ×320

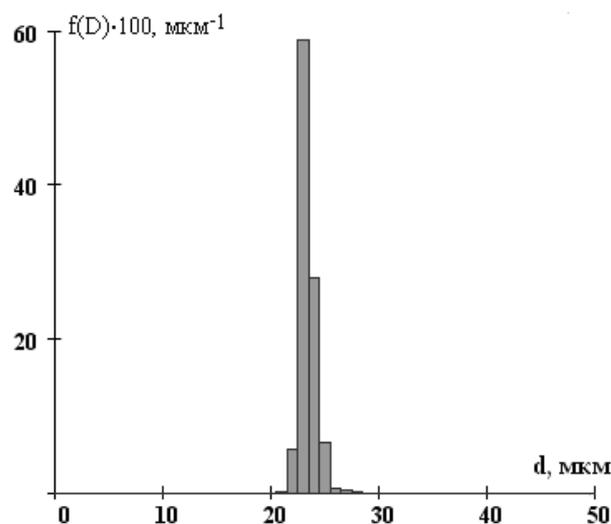


Рисунок 3 – Гистограмма распределения частиц по размерам для монодисперсного аэрозоля диаметром 23 мкм, полученного на АСОД-300

Дисперсный анализ пылеугольного топлива

Большинство природных и искусственно получаемых аэрозолей обладает довольно значительной полидисперсностью. В связи с этим возникает необходимость найти распределение частиц по размерам, которое можно выразить несколькими способами. Анализ данного порошка производился на соответствие извест-

ным эмпирическим распределениям: Роллера и логнормального.

Логарифмически нормальное распределение применимо к большинству аэрозолей и описывает счетное распределение:

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot d \cdot \ln \beta} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 \beta} \right], \quad (1)$$

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot d \cdot \ln \beta} \exp \left[-\frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2 \ln^2 \beta} \right], \quad (2)$$

где d_g – средний геометрический размер частицы: $\ln d_g = \overline{\ln d}$, представляющий одновременно размер частиц, по которому все количество частиц делится на равные части; β – стандартное геометрическое отклонение $(\ln \beta)^2 = \overline{(\ln d - \ln d_g)^2}$.

Зависимость $f(d)$ есть счетная дифференциальная кривая распределения размеров частиц и показывает счетную долю числа частиц, размеры которых лежат в пределах $(d, d + \delta d)$.

Для обработки данных часто используют счетные и массовые интегральные функции распределения $F(d)$ и $G(d)$, показывающие долю частиц (по счету или по массе), обладающие диаметром меньше данной величины d .

Распределение Роллера применяется к большому числу промышленных порошкообразных материалов и описывает массовое распределение:

$$G(d) = a\sqrt{d} \exp \left(-\frac{s}{d} \right), \quad (3)$$

где a и s – параметры распределения.

Для обработки данных, полученных с АСОД-300, была написана программа, позволяющая быстро определять параметры этих распределений. Анализ проводился для полученного дифференциального распределения частиц исследуемого порошка общей численностью 10015 частиц (рисунок 4). В диапазоне 10–13 мкм наблюдался максимум на дифференциальной функции распределения, что объясняется особенностью работы АСОД-300 вно-

силь в эту фракцию все частицы, размеры которых меньше 10 мкм.

Для проверки на логнормальное распределение использовалась логарифмически вероятностная координатная сетка, позволяющая определить размеры частиц $d_{0,841}$, $d_{0,5}$, $d_{0,159}$. Они соответствуют диаметрам частиц, для которых доля частиц с размерами меньше данного, составляет 0,841, 0,5 и 0,159 соответственно.

Таким образом, средний размер $d_g = d_{0,5}$ и соответствует размеру частицы, по которому все количество частиц делится на равные части. Определив экспериментально эти размеры, можно рассчитать β по формуле:

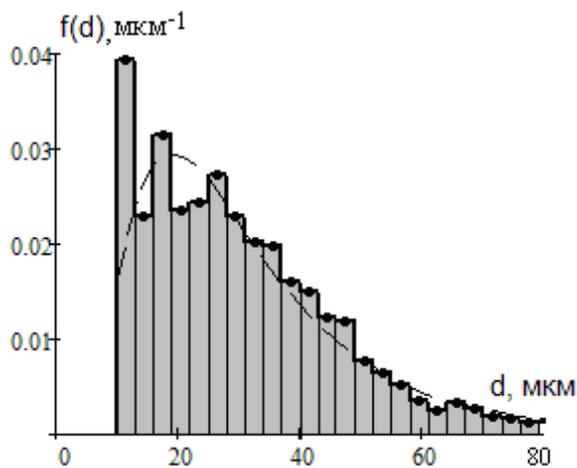
$$\beta = \frac{d_{0,841}}{d_{0,5}} = \frac{d_{0,5}}{d_{0,159}}. \quad (4)$$

В результате получены следующие характеристики пылеугольного топлива: $d_{0,159} = 14,9$ мкм, $d_{0,5} = 26,9$ мкм, $d_{0,841} = 48,6$ мкм, $\beta = 1,8$. Подстановка этих параметров в распределение (1) показывает на его удовлетворительное описание полученных данных (рисунок 4).

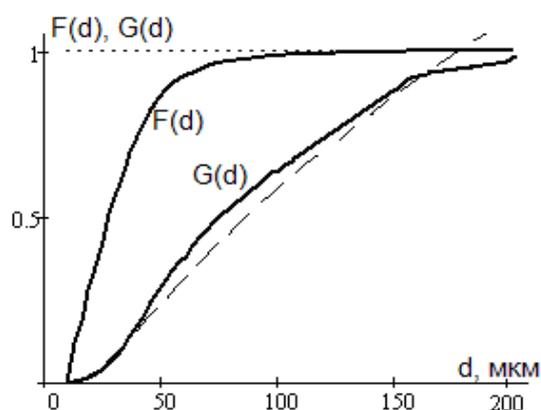
При вдувании пылеугольного топлива в фурменный очаг доменной печи необходимо добиться доли частиц меньше 80 мкм около 70–90 %. При этом средний медианный размер частиц пыли обычно составляет 30–35 мкм [5, 6]. В этом варианте удается достигать высокой полноты его сгорания в фурменной зоне.

Для обработки массового распределения по размерам частиц использовалось общее число частиц и значение плотности ($\rho = 810$ кг/м³), найденное с помощью пикнометра. После задания этих значений программа автоматически для каждой фракции диаметров производит расчет массовой доли и строит интегральную массовую функцию распределения (рисунок 4б). Обработка данного распределения производилась в предположении распределения Роллера (2), применяемого часто для промышленных порошкообразных веществ. В результате найдены следующие параметры в распределении (2): $a = 0,10$ мкм^{-1,5}, $s = 56,2$ мкм.

Преимуществом данного метода получения массового распределения в сравнении со стандартным ситовым методом является значительно меньшее время, необходимое для получения результата.



а

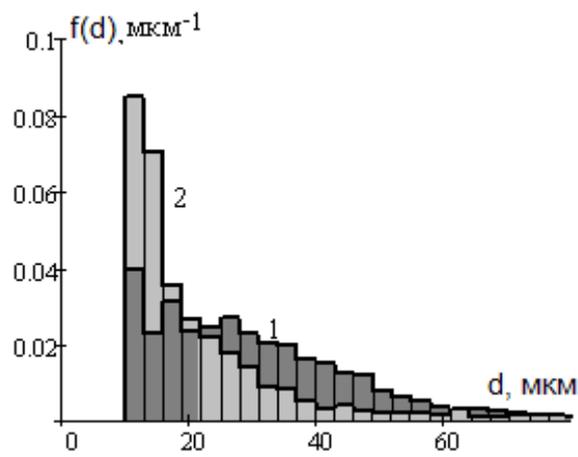


б

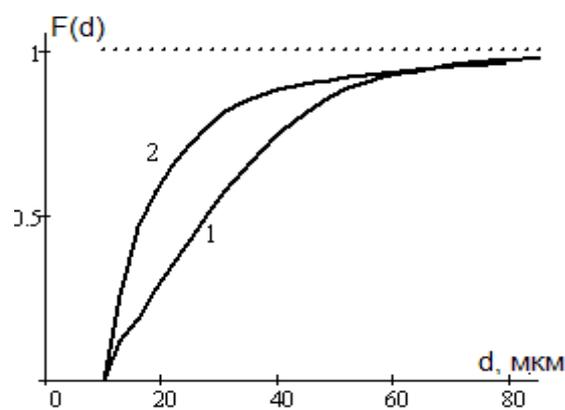
Рисунок 4 – Дифференциальные и интегральные распределения частиц пылеугольного топлива по размерам. Пунктир: а – логнормальное распределение, б – распределение Роллера

Результаты по дисперсному анализу порошка пылеугольного топлива также получены методом цифровой микроскопии. Для этого использовался двухочувствительный микроскоп с прикрепленной к окуляру вебкамерой. Сигнал подавался на компьютер, где производилась фотосъемка и цифровая обработка результатов. При этом с целью сравнения двух методик накладывалось ограничение: распознавались лишь частицы с размеров больше 10 мкм (рисунок 5). Полученное распределение (для 1250 частиц) проверялось на возможность описания логнормальным распределением (1). В результате получены его характеристики: $d_{0,5} = 17,0$ мкм, $\beta = 2,2$.

В результате использования цифрового микроскопа показано, что распределение смещено в область мелких частиц.



а



б

Рисунок 5 – Сравнение гистограмм (а) и интегральных распределений (б) частиц пылеугольного топлива по размерам, полученных на автоматизированной системе определения дисперсности (1) (темная зона) и методом цифровой микроскопии (2) (светлая зона)

Данное расхождение можно объяснить тем фактом, что мелкие частицы очень хорошо коагулируют на поверхности крупных частиц, соединяются в крупные, образуя конгломераты.

Количественная доля таких частиц (меньше 10 мкм) очень высока, несмотря на то, что их массовая доля в порошке незначительна. При засыпке исследуемого порошка в дезагрегатор АСОДа очень мелкие частицы прилипают не только к более крупным частицам, но и к элементам дезагрегатора (например, лопастям вентилятора). На первой стадии работы АСОД скорость вращения центробежного устройства невелика. Поэтому прибор определяет размер крупных частиц, преимущественно более 20 мкм. После возрастания скорости вращения центробежного устройства и последующего отрыва от лопастей в распределение добавляется

информация о размерах частиц более мелких фракций. Относительная доля мелкой фракции таким образом оказывается уменьшенной, а крупной – увеличенной.

В то же время, несмотря на наличие большого числа частиц с размерами около 10 мкм, результаты по двум методикам имеют неплохое согласие.

Заключение

Разработана методика определения дисперсности с помощью автоматизированной системы, работа которой основана на теновом методе.

С ее помощью проведен гранулометрический анализ порошка пылеугольного топлива:

– счетное распределение частиц угольной пыли по размерам удовлетворяет логарифмически нормальному закону;

– массовое распределение частиц по размерам хорошо описывается распределением Роллера;

– средний медианный размер частиц пылеугольного топлива составил 26,9 мкм.

Сравнение методик определения дисперсности с помощью автоматизированной системы и цифровой микроскопии показало хорошее согласование результатов по гранулометрическому составу порошков.

Преимуществом использования автоматизированной системы определения дисперсности является существенное уменьшение времени получения качественных и количественных результатов по определению гранулометрического состава порошков пылеугольного топлива.

Список использованных источников

1. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. Коузов. – Л. : Химия, 1974. – 279 с.
2. Градус, Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л.Я. Градус. – М. : Химия, 1979. – 232 с.
3. Беляев, С.П. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.
4. White, D.J. PSD measurement using the single particle optical sizing (SPOS) method / D.J. White // *Geotechnique*. – 2003. – Vol. 53, Issue 3. – P. 317–326.
5. Кочура, В.В. Методика определения степени сгорания пылеугольного топлива в доменных печах / В.В. Кочура [и др.] // *Металлург*. – 2013. – № 8. – С. 26–34.
6. Кочура, В.В. Исследование и оптимизация фракционного состава пылеугольного топлива, вдуваемого в горн доменных печей ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод» / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.В. Брага // *Научные труды ДонНТУ. Металлургия*. – 2011. – № 13. – С. 44–53.

DETERMINATION OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF PULVERIZED COAL BY AUTOMATED SYSTEM

Chernenko A.S.¹, Kontush S.M.¹, Zinchenko A.S.², Kalinchak V.V.¹, Kalugin V.V.³

¹Odessa I.I. Mechnikov national university, Odessa, Ukraine

²Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol, Ukraine

³Physical-Chemical Institute for Environmental and Human Protection, Odessa, Ukraine
e-mail: chernalex@ukr.net

Abstract. The method of granulometric composition determination of dry powders by a shadow method in the automated system of determination of quantitative structure is described. The granulometric analysis of coal-dust fuel particles is carried out. Comparison with results of digital microscopy allowed to establish a variety of used method advantages.

Keywords: dispersion, distributing, size, powder, digital microscopy.

References

1. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promishlennykh piley i izmelchionnykh materialov* [Bases for the analysis of the dispersible composition of industrial dust and crushed materials]. Leningrad, Chemistry Publ, 1974. 279 p. (in Russian).
2. Gradus L.Ya. *Rukovodstvo po dispersnomu analizu metodom mikroskopii* [Manual to analysis of a microscopy method]. Moskow, Chemistry Pupil., 1979. 232 p. (in Russian).
3. Belyaev S.P., Nikiforova N.K., Smirnov V.V., Tcheglov G.I. *Optiko-elektronnye metody izucheniya aerorozley* [Optical-electronic methods of studying of aerosols]. Moskow. Energopubl., 1981. 232 p. (in Russian).
4. White D.J. PSD measurement using the single particle optical sizing(SPOS) method // *Geotechnique*. 2003. Vol. 53, Issue 3. P. 317–326.
5. Kochura V.V., Yaroshevskiy S.L., Kупenko V.I. Mishin I.V. [Method of determination of combustion's degree of coal-dust fuel in blast furnaces] // *Metallurg*. 2013. № 8. P. 26–34.
6. Kochura V.V., Yaroshevskiy S.L., Braga V.V. [Research and optimization of the fractional composition pulverized coal, injected into a horn of blast furnaces PSC «Donetsk metallurgical plant»] // *Nauchnie trudi DonNTU. Metallurgiya*. 2011. № 13. P. 44–53.

Поступила в редакцию 30.12.2014.

УДК 621.382

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА МОП-СТРУКТУР ПО ВОЛЬТ-ФАРАДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

*Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Филипня В.А.², Шведов С.В.²,
Черный В.В.³, Явид В.Ю.¹, Янковский Ю.Н.¹*

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: prosolovich@bsu.by

Исследованы МОП-транзисторы методом вольт-фарадных характеристик, изготовленных в разное время, но по аналогичным технологическим маршрутам и при использовании идентичных технологических материалов. Установлено, что измерения вольт-фарадных характеристик МОП-структур позволяют проводить диагностику качества подзатворного диэлектрика. Вид и форма измеренных характеристик определяются величиной дополнительного положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂, которые коррелируют с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов, что позволяет сделать заключение о качестве используемых материалов и соблюдении технологических режимов.

Ключевые слова: вольт-фарадные характеристики, МОП-транзистор, технологические примеси.

Введение

В процессе производства КМОП-структур необходимо проведение большого количества различных технологических операций, в особенности при использовании МДП-технологии. В данном случае весьма важным является выбор химических реактивов и назначение такой последовательности технологических, особенно высокотемпературных, операций, которые в максимально возможной степени снижали бы попадание неконтролируемых (технологических) примесей (ТП) при формировании структуры. Повышенная концентрация ТП обуславливает значительное ухудшение эксплуатационных характеристик создаваемых приборов и снижение процента выхода годных кристаллов.

Ранее было показано [1], что электрофизические характеристики МОП-транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Предполагалось, что увеличение порогового напряжения и токов утечки затвора, а также снижение тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и

в области насыщения, проводимости структуры в линейной области обусловлены наличием дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Сделан вывод, что наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров МОП-транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Для экспериментального подтверждения этих предположений было проведено исследование МОП-структур методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) в зависимости от содержания технологических примесей на поверхности пластин кремния.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе исследованы МОП-транзисторы, изготовленные в разное время (приборы серии В изготавливались при применении технологической оснастки непосредственно после ее замены

на «свежую», приборы серии *A* – в конце регламентированного срока использования технологической оснастки) по аналогичным технологическим маршрутам с использованием идентичных технологических материалов. Измерения ВФХ проводились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500 A* и зондовой станции *Cascade Summit 11000*. На пластинах кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см создавались карманы МОП-транзисторов (70 × 70 мкм) ионным легированием бором для *p*-кармана, фосфором и мышьяком для *n*-кармана. Поликремниевый затвор транзистора, легированный до вырождения, имел размеры 10 × 10 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика (SiO₂) составляла 8 нм. Измерения ВФХ проводились на частоте $f = 1,0$ МГц, с разверткой по напряжению от – 5 до + 3 В, с шагом 50 мВ для тестов на *p*-кармане, для тестов на *n*-кармане – при напряжении ± 3 В с тем же шагом. Концентрация металлических примесей на поверхности пластин определялась методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке *Rigaku TXRF 3750* [2, 3].

Вольт-фарадные характеристики МОП-структур представлены на рисунке 1. Следует отметить, что для приборов серии *A* в случае измерений на *n*-кармане наблюдается сдвиг характеристик вдоль оси напряжений в сторону более отрицательных значений по сравнению с измерениями для приборов серии *B*. Данный факт свидетельствует о наличии в диэлектрике для приборов серии *A* дополнительного положительного эффективного неподвижного заряда, электронные уровни которого располагаются в объеме диэлектрика и не могут быть перезаряжены в течение эксперимента вследствие малой электронной проводимости диэлектрика. Кроме того, на кривых для приборов как серии *A*, так и серии *B* на ВФХ наблюдается пик, характерный для низкочастотных ВФХ. Это обусловлено тем, что поверхностные состояния, расположенные вблизи середины запрещенной зоны имеют времена релаксации ~ 1,0–10 мкс, а поверхностные состояния, находящиеся вблизи разрешенных зон (зона проводимости и валентная зона) – 0,01–1,0 мкс, и частотная зависимость ВФХ для них смещается в область более высоких частот.

Различие в наклонах кривых обеих серий приборов обусловлено различиями в емкости и напряжении плоских зон (определяемых при экстраполяции на ось напряжений наклонов

экспериментальных кривых), которые имели соответственно значения 21,08 пФ и 0,213 В для приборов серии *A*, 19,72 пФ и 0,174 В – для приборов серии *B*.

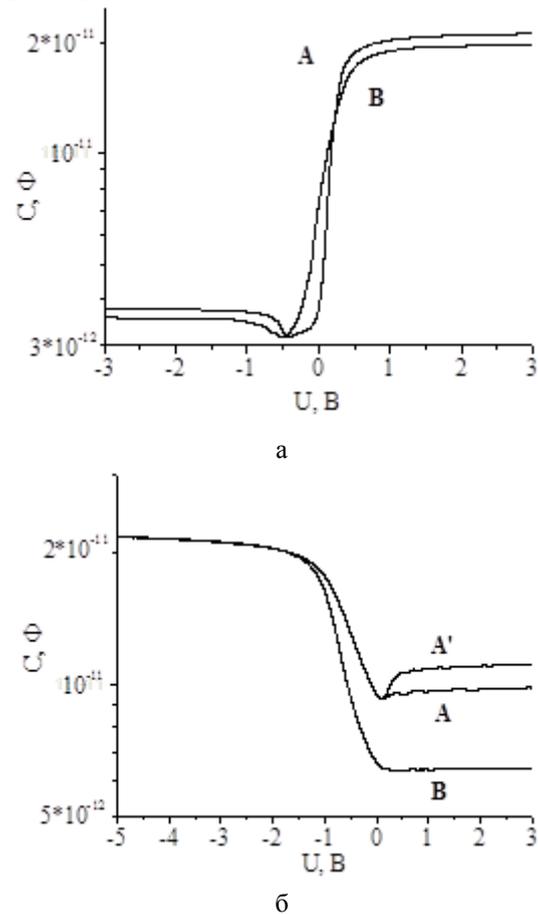


Рисунок 1 – Вольт-фарадные характеристики МОП-транзисторов, измеренные на *n*-кармане (а) и на *p*-кармане (б)

Емкость и напряжение плоских зон при измерениях на *p*-кармане приборов серии *A* имеют соответственно значения 21,72 пФ и – 1,220 В, для приборов серии *B* – 21,78 пФ и – 1,050 В. Существенного смещения кривых ВФХ по оси напряжений при данном режиме измерений не наблюдалось (рисунок 1б). Сдвиг относительно теоретической кривой для обоих видов приборов был примерно одинаковым, что свидетельствует о примерном равенстве величин неподвижного дополнительного заряда в диэлектрике. Различия в наклонах кривых для приборов различных серий обусловлено, как и в случае исследований на *n*-кармане, различием в плотности быстрых поверхностных состояний. Наибольшее несоответствие для ВФХ, измеренных на *p*-кармане (рисунок 1б), между приборами обеих серий наблюдается в области инверсии, в

области обогащения кривые практически совпадают. Это позволяет сделать заключение о том, что разница в плотности быстрых поверхностных состояний наибольшая для центров, имеющих энергетические уровни в верхней половине запрещенной зоны. Из того, что поверхностные состояния лежат вверху запрещенной зоны и имеют донорный характер, следует, что они нейтральны, когда заполнены электронами, и заряжены, когда пусты. Кроме того, для ряда МОП-структур при измерениях на *p*-кармане приборов серии *A* на ВФХ наблюдается пик, характерный для низкочастотных измерений (рисунок 1б, кривая *A'*). Это свидетельствует о том, что у приборов данной серии, в отличие от приборов серии *B*, наблюдаются быстрые поверхностные состояния со временами релаксации менее 1 мкс, вследствие чего генерация неосновных носителей и заполнение поверхностных состояний не успевают следовать за изменениями внешнего напряжения.

Следует отметить, что наличие пика на кривых ВФХ наблюдалось не для всех приборов серии *A* (рисунок 1б, кривые *A* и *A'*), эксперименты проводились более чем по 20 точкам на пластине), что свидетельствует о неоднородном распределении быстрых поверхностных состояний по поверхности пластины.

Учитывая, что данные состояния могут быть связаны с присутствием в окисле ионов щелочных (Na^+ , K^+ , Li^+) и тяжелых металлов, а также ионов H_3O^+ , адсорбированных на поверхности ионов, кислородных вакансий, ловушек в окисле, попадающих в окисел из окружающей среды полярных молекул и материалов, используемых в технологическом процессе, было проведено исследование распределения по поверхности пластин различных технологических примесей. Топограммы распределения технологических примесей по поверхности пластин, на которых были изготовлены приборы серии *A*, показаны на рисунке 2. Наблюдаются локальные области, содержащие Cl ($1,2 \cdot 10^{12}$ ат/см²), K ($1,6 \cdot 10^{11}$ ат/см²), Ca ($7,4 \cdot 10^{10}$ ат/см²), а также локальные области Ti, Cr, Cu, Zn и других примесей. Вся поверхность пластины покрыта слоем Fe со средней концентрацией $\sim 2,0 \cdot 10^{11}$ ат/см², причем по поверхности пластины данная примесь распределена существенно неравномерно. Типичные распределения ТП железа по пластине показаны на рисунке 3. Следует отметить, что данная ТП оказывает весьма негативное влияние на напряжение пробоя подзатворного

диоксида кремния толщиной 3–10 нм. Так, при концентрации железа в объеме более $5 \cdot 10^{11}$ ат/см³ происходит резкое уменьшение напряженности поля пробоя подзатворного диоксида кремния [4]. На топограммах пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*, наблюдаются только пятна Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения (для Fe < $4,0 \cdot 10^9$ ат/см²).

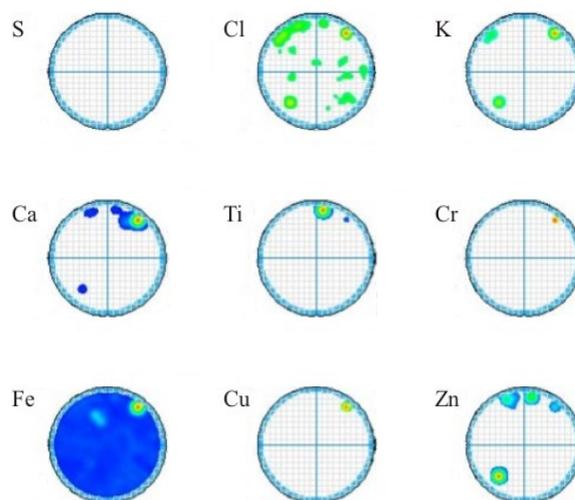


Рисунок 2 – Распределение технологических примесей по поверхности исходных кремниевых пластин, на которых были изготовлены приборы серии *A*

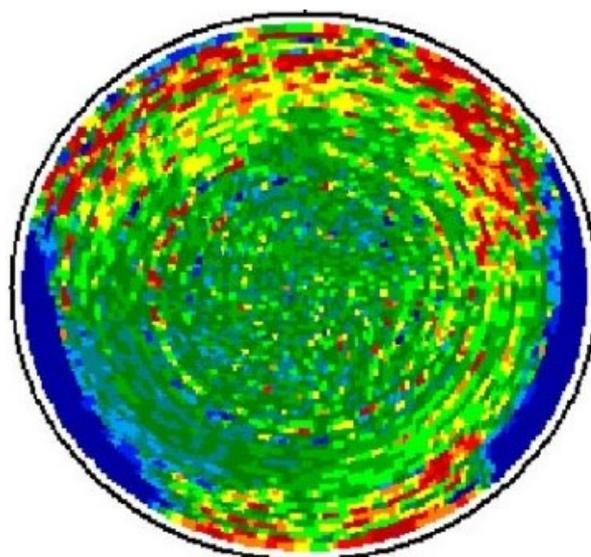


Рисунок 3 – Распределение концентрации железа по площади пластины для приборов серии *A*. Наиболее темный цвет соответствует максимальной концентрации железа

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что дополнительный неконтролируемый заряд, локализованный в области затвора МОП-транзистора, в значительной мере обусловлен присутствием неконтролируемых примесей, концентрация которых превышает минимально допустимые величины, попадающих в полупроводниковую структуру в процессе проведения технологических операций или повышенным содержанием ТП в исходном полупроводниковом монокристалле. При термическом окислении кремния и других высокотемпературных технологических операциях, используемых при изготовлении приборов, многие неконтролируемые примеси, адсорбированные на его поверхности, частично десорбируются, а частично переходят в систему кремний–диоксид кремния, изменяя ее электрофизические свойства. При этом в слое диэлектрика образуется дополнительный положительный заряд, а на границе раздела Si/SiO₂ возрастает плотность быстрых поверхностных состояний, которые распределены по поверхности пластины неравномерно. Их плотность коррелирует с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов. Количество частиц, захваченных при данной температуре, определяется их физико-химическими свойствами и концентрацией на исходной поверхности. Увеличение числа адсорбированных частиц приводит, как правило, к возрастанию их концентрации в окисленных образцах и, как следствие, к изменению энергетической плотности быстрых поверхностных состояний, величины постоянного заряда в оксиде, заряда на ловушках в слое диэлектрика и заряда подвижных ионов.

Энергетическая плотность быстрых поверхностных состояний, которые расположены непосредственно на границе Si-SiO₂, сильно зависит от режима получения окисла. Величина постоянного заряда в оксиде зависит от режима окисления, условий отжига и вида предокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы Si-SiO₂ катионными примесями. Заряд на ловушках в слое оксида представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO₂. Этот тип заряда ассоциируется с медленными поверхностными состояниями. Заряд подвиж-

ных ионов связан с присутствием в оксиде ионов щелочных металлов (Na⁺, K⁺, Li⁺) и ионов тяжелых металлов, попадающих в окисел из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе.

Заключение

Установлено, что измерения вольт-фарадных характеристик МОП-структур позволяют проводить диагностику качества подзатворного диэлектрика. Вид и форма измеренных характеристик определяются величиной дополнительного положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Данные значения коррелируют с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов.

Анализ вольт-фарадных характеристик МОП-структур является альтернативным методом контроля чистоты проведения технологических процессов изготовления интегральных микросхем. Для его проведения требуется относительно дешевое, по сравнению с рентгенофлуоресцентным методом полного внешнего отражения, оборудование для измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов. При этом контролируется непосредственное влияние примесей на характеристики приборов. Результаты контроля позволяют своевременно корректировать условия проведения технологических операций.

Список использованных источников

1. *Оджаев, В.Б.* Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора / В.Б. Оджаев [и др.] // Вестн. НАНБ Сер. физ.-тех. наук. – 2014. – № 4. – С. 14–17.
2. SEMI M33-0988.
3. *Berneike, W.* Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Fresenius'Z. Anal. Chem. – 1989. – Vol. 333. – P. 524–526.
4. *Choi, B.D.* Degradation of ultrathin oxides by iron contamination / B.D. Choi, D.K. Schroder // Applied physics letters. – 2001. – Vol. 79, no 16. – P. 2645–2647.

**QUALITY ANALYSIS OF THE GATE DIELECTRIC OF THE MOS-STRUCTURES
BY CAPACITY-VOLTAGE CHARACTERISTICS**

Odzhaev V.B.¹, Pyatlitski A.N.², Prosolovich V.S.¹, Filipenya V.A.², Shvedau S.V.², Chernyi V.V.³, Yavid V.Yu.¹, Yankouski Yu.N.¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Minsk, Belarus

³Belarusian National Technical University

e-mail: prosolovich@bsu.by

Abstract. There were investigated the capacity-voltage characteristics of the MOS transistors, fabricated by the similar process charts, with the identical applied technological materials), however at various time (appropriately further in the text series A and series B). It was shown, that the measurements of the capacity-voltage characteristics of the MOS structures make it possible to perform the quality diagnostics of the gate dielectric. The kind and shape of the measured characteristics are determined by the value of the additional positive charge in the dielectrics and density of the fast surface states on the Si-SiO₂ interface, which correlate with the surface concentration of the technological impurities, adsorbed on the surface of the wafers in process of the devices fabrication, which makes it possible to make a conclusion about the quality of the applied materials and compliance of the manufacturing process.

Keywords: capacity-voltage, MOS-transistor, technological admixtures.

References

1. Odzhaev V.B., Pyatlitski A.N., Prosalovich V.S., Turtsevich A.S., Shvedau S.V., Filipenia V.A., Chorny V.V., Yavid V.Yu., Yankouski Yu.N., Dubrouski V.A. [Influence of technological impurities on electrical parameters of mos transistor]. *Vestci NANB Ser. fis.-tekh. navuk*, 2014, no 4, pp.14–17. (in Russian).
2. SEMI M33-0988.
3. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U., Fresenius Z. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis. *Fresenius 'Z. Anal. Chem.*, 1989, vol. 333, pp. 524–526.
4. Choi B.D., Schroder D.K. Degradation of ultrathin oxides by iron contamination. *Applied physics letters*, 2001, vol. 79, no 16, pp. 2645–2647.

Поступила в редакцию 17.02.2015.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ИДЕНТИФИКАЦИОННОГО ПРИЗНАКА ПАЛЬМОВЫХ МАСЕЛ

*Кадолич Ж.В.¹, Зотов С.В.², Гольдаде В.А.^{2,3}, Цветкова Е.А.³,
Обчинников К.В.², Ухарцева И.Ю.¹*

¹Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации,
г. Гомель, Республика Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
г. Гомель, Республика Беларусь,

³Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь
e-mail: zotov-1969@mail.ru

Метод термоактивационной токовой спектроскопии использован для идентификации двух популярных разновидностей пальмовых масел. Спектр термостимулированных токов представляет собой достаточно интенсивные (до 10^{-11} А) пики, обусловленные различиями в жирнокислотном составе масел. Введение представления о малостабильных ассоциатах, в которых координационными связями объединены молекулы глицеридов жирных кислот, позволяет интерпретировать экспериментальные данные по токовому отклику при нагревании образцов масел. Расположение пиков на спектре термоактивационной токовой спектроскопии в определенном температурном диапазоне может рассматриваться в качестве идентификационного признака растительных масел исследованной группы.

Ключевые слова: термоактивационная токовая спектроскопия, пальмовые масла, термостимулированные токи, малостабильные ассоциаты, жирные кислоты.

Введение

На практике часто возникает проблема идентификации растительных масел, а также разделения пищевых и технических масел с целью обеспечения безопасности пищевых продуктов на масложировой основе [1]. Вид и степень очистки нерафинированного, гидратированного и рафинированного недезодорированного масла определяют органолептическими методами, что не всегда является достаточным. Методы оценки физико-химических свойств масел на основе магнитных, оптических эффектов, рентгеновской флуоресцентной спектроскопии, ядерного магнитного резонанса, хроматографического анализа [1] зачастую оказываются трудоемкими и не отвечают критерию экспресс-теста.

Метод термоактивационной токовой спектроскопии [2] позволяет получить токовый отклик на процессы релаксации заряда в диэлек-

трических объектах в виде спектра термостимулированных токов (ТСТ) – кривой зависимости тока от температуры. Сущность метода состоит в регистрации тока, возникающего в образце вследствие стимулированных нагреванием процессов разупорядочения диполей, высвобождения носителей заряда из ловушек и их движения. Расположение на температурной шкале экстремальных областей (токовых пиков) и их величина являются идентификационными признаками, по которым можно установить механизм релаксации заряда в анализируемом образце, исходя из общепринятых представлений об электрентном состоянии. Термоактивационная токовая спектроскопия (другое наименование – «электрентно-термический анализ» [3]) используется для изучения полимерных диэлектриков, смесей полимеров [4], композитов [5], электрически активных коллоидов [6], медицинских препаратов для лечения заболеваний суставов [7], крови человека [8, 9].

В работе [10] обоснована методологическая применимость термоактивационной токовой спектроскопии для анализа растительных масел как диэлектрической среды. Получены пригодные для интерпретации спектры ТСТ образцов подсолнечного, льняного масла и масла-какао, которые оказались специфичными для каждого вида масла. Анализ этих результатов, проведенный с позиций базовых представлений физики конденсированного состояния и органической химии, позволил выдвинуть гипотезу о роли ненасыщенных жирных кислот в процессах образования носителей заряда, движение которых регистрировалось как ТСТ. Однако для такого широко распространенного продукта, как пальмовые масла, занимающие особое место в структуре мирового производства, подобный эксперимент ранее не проводился.

Цель работы состоит в обосновании использования метода термоактивационной токовой спектроскопии для выявления идентификационных признаков, по которым можно охарактеризовать образцы пальмового и пальмово-ядрового масла.

Эксперимент

Функциональная схема измерительного комплекса для термоактивационной токовой спектроскопии представлена на рисунке 1. Установка включает измерительную ячейку с двумя алюминиевыми электродами, расположенную в термокамере. Изоляция электродов осуществляется с помощью термостойких диэлектриков (фторопласт-4, керамика), обеспечивающих сопротивление изоляции не менее 10^{12} Ом. В составе измерительного комплекса имеется автоматическое устройство для программируемого повышения температуры в термокамере (контроллер-терморегулятор с термопарой), а также пикоамперметр, обеспечивающий измерение ТСТ в диапазоне 10^{-13} – 10^{-5} А с погрешностью не более 5 %. Процесс измерения включает размещение анализируемого образца между двумя электродами в ячейке, линейный нагрев образца, регистрацию и усиление слабых токов, а также графическое представление их зависимости от температуры, которое осуществляется с помощью специальной компьютерной программы.

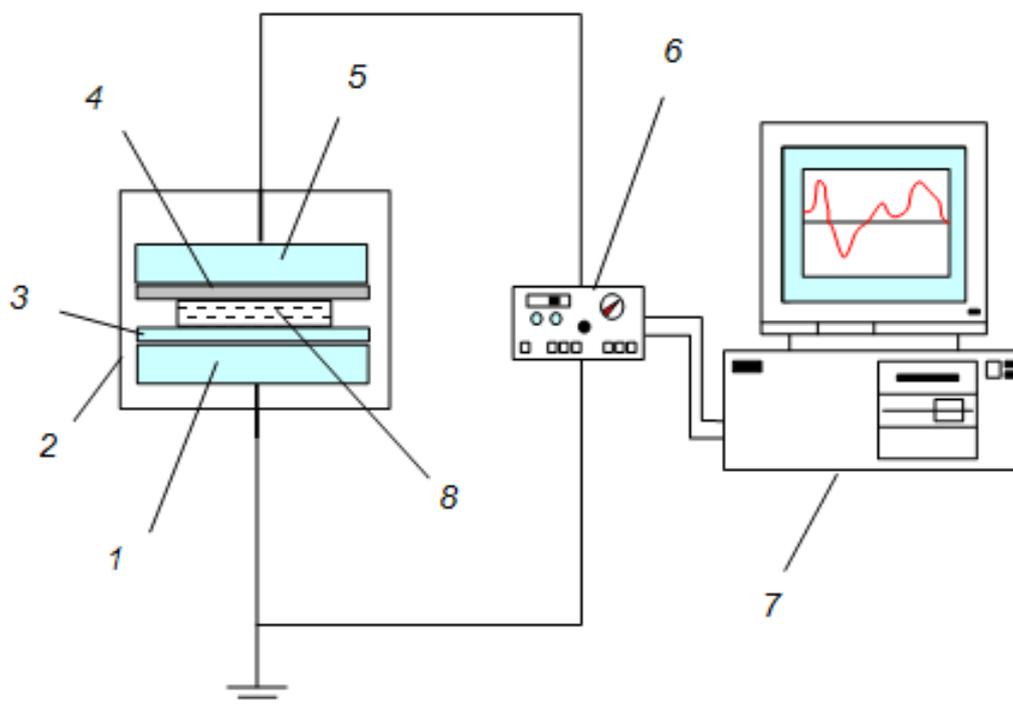


Рисунок 1 – Схема измерительного комплекса для регистрации и записи термостимулированных токов: 1 – нижний электрод (Al); 2 – разборный экран; 3 – нижняя прокладка (фольга Al); 4 – верхняя прокладка (фторопласт-4); 5 – верхний электрод (Al); 6 – усилитель-преобразователь; 7 – персональный компьютер со специализированным программным обеспечением; 8 – анализируемый образец

Исследовали образцы пальмового рафинированного дезодорированного масла (сертификат качества 276-2014/1208) и пальмоядрового рафинированного дезодорированного масла (сертификат качества 118-2014/8012) от изготовителя *Pt. Pacific Indopalm Ind.* (страна происхождения – Индонезия). Согласно протоколу испытаний, образцы масла соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и ТР ТС 024/2011 «Технический регламент на масложировую продукцию» (таблица 1).

Таблица 1

Характеристика объектов исследования

Показатели качества	Характеристика или значение для масла	
	пальмовое	пальмоядровое
Цветность по Ловибонду	3,5 красные, 35 желтые	0,7 красные, 8 желтые
Консистенция	полутвердая неоднородная	
Точка плавления, °С	37,5	27,8
Перекисное число, ммоль активного кислорода /кг	5,7	0,6
Кислотное число, мг КОН/г	0,4	0,1
Йодное число, г I ₂ /100 г	53,2	19,3

Исследуемые высоковязкие образцы масел (массой 0,5 г) располагали на прокладке из фольги, тесно контактирующей с нижнем электродом (диаметр 30 мм), накрывали тефлоновой прокладкой (толщина 10 мкм, диаметр 30 мм) для создания регулируемого зазора и плотно прижимали верхний электрод (диаметр 20 мм). Равномерный нагрев осуществляли со скоростью 2 °С/мин в диапазоне температур 20–95 °С.

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе исходили из предположения, что пальмовые масла, обладающие полутвердой неоднородной консистенцией, будут демонстрировать схожее электрофизическое поведение.

С целью проверки этого предположения методом термоактивационной токовой спектроскопии получены спектры ТСТ пальмового и пальмоядрового масла. Установлено, что в процессе нагревания образцов фиксируется спектр ТСТ несколько другого вида, нежели для жидких растительных масел. Для пальмового масла (рисунок 2) регистрируется группа хорошо выраженных токовых пиков с интенсивностью до 9 пА в температурном диапазоне 30–40 °С. Для пальмоядрового масла (рисунок 3) спектр содержит один выраженный токовый пик с интенсивностью до 22 пА в более узком температурном диапазоне 30–35 °С. Спектры ТСТ пальмового и пальмоядрового масел характеризуются удовлетворительной воспроизводимостью при повторении эксперимента с каждым из этих образцов (сдвиг такого максимума на температурной шкале не более ±2 °С, изменение интенсивности пиков ±10 %), а также отсутствием посторонних токовых сигналов и искажений. Характерно, что экстремальные области на обоих спектрах ТСТ (рисунки 2 и 3) расположены вблизи указанных в сертификатах качества точек плавления: для пальмового масла – 37,5 °С, для пальмоядрового масла – 27,8 °С.

Для выяснения вопроса о том, какие физико-химические процессы являются ответственными за токовый отклик в образцах, целесообразно проанализировать данные о составе исследуемых видов масел (таблица 2). По жирнокислотному составу [11, 12] пальмовое масло относится к олео-пальмитиновой группе, а пальмоядровое – к лауриновой группе (таблица 3). Преобладающими жирными кислотами (в виде глицеридов) в составе пальмового масла являются пальмитиновая и олеиновая, в составе пальмоядрового масла – лауриновая, миристиновая и олеиновая. Общее содержание глицеридов насыщенных жирных кислот в пальмовом масле является высоким, в пальмоядровом масле – чрезвычайно высоким.

Данные о составе объектов исследования позволяют предположить протекание следующих процессов. Высвобождение заряда, обусловливающего появление на спектре ТСТ экстремальной области, сопутствует фазовому переходу образца масла из полутвердого состояния в жидкое. Это высвобождение заряда может быть обусловлено разрывом координационных связей в ассоциатах – надмолекулярных образованиях, объединяющих несколько

молекул глицеридов жирных кислот. Глицериды насыщенных жирных кислот, составляющие основную фракцию пальмового и пальмоядрового масла, связываются в ассоциаты, предположительно путем донорно-акцепторного взаимодействия между полярными (кислородсодержащими) группами. В то же время для глицеридов ненасыщенных жирных кислот можно предположить участие в аналогичном взаимодействии как кислородсодержащих групп, так и участков молекул с ненасыщенными связями. В результате ассоциаты, содержащие разные виды жирных кислот, будут различаться как по структуре, так и по энергии связи между образующими их компонентами.

В соответствии с этим, вид экстремальной области на рисунке 2 может быть обусловлен разной энергией координационных связей в ассоциатах ввиду значительно большего содержания ненасыщенной фракции в пальмовом масле, чем в пальмоядровом масле (таблица 2).

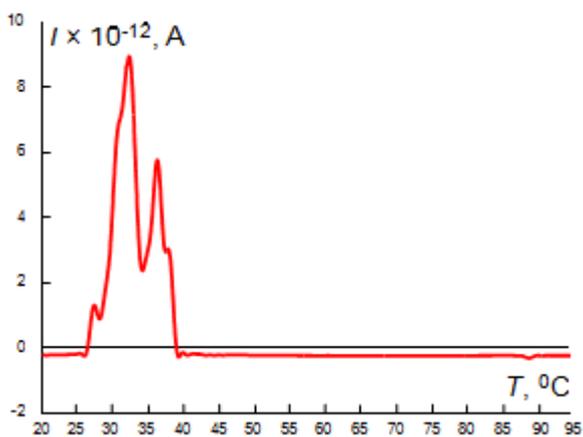


Рисунок 2 – Спектр термостимулированного тока пальмового масла

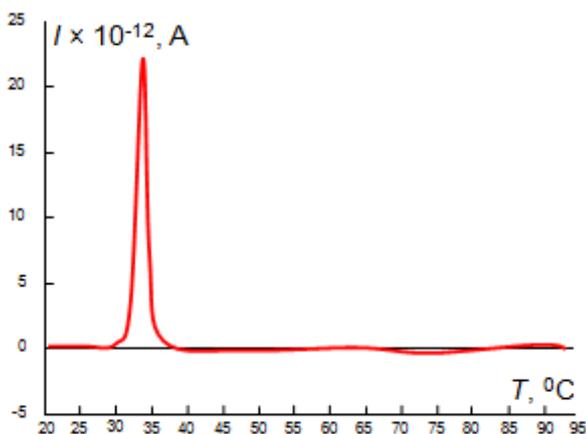


Рисунок 3 – Спектр термостимулированного тока пальмоядрового масла

Таблица 2

Характеристика жирнокислотного состава масел [11, 12]

Вид масла	Жирные кислоты, %		
	насыщенные	мононенасыщенные	полиненасыщенные
Пальмовое	48	43	9
Пальмоядровое	83	15	2

Таблица 3

Жирные кислоты в пальмовом и пальмоядровом маслах [11, 12]

Кислота	Содержание, %, в масле	
	пальмовое	пальмоядровое
Миристиновая	1–4,5	14–17
Пальмитиновая	32–47	6,5–9
Стеариновая	2–6,5	1–2,5
Арахидиновая	0,2	–
Олеиновая	39–51	16–19
Линолевая	5–11	1–2
Линоленовая	0,2	–
Каприловая	–	3–4
Лауриновая	–	46–52

На рисунке 2 (пальмовое масло) левый пик ТСТ может быть соотнесен с разрушением «ненасыщенных» ассоциатов, а правый, более близкий к температуре плавления, – с разрушением «насыщенных» ассоциатов. На рисунке 3 (пальмоядровое масло) интенсивный одиночный пик ТСТ может быть соотнесен с согласованным разрушением ассоциатов при переходе образца в текучее состояние.

Проведенные исследования позволяют предположить, что на формирование комплекса свойств растительного масла как диэлектрического объекта оказывает влияние его жирнокислотный состав. По-видимому, взаимное соотношение глицеридов жирных кислот обуславливает и консистенцию конкретного вида масла, и характер связывания глицеридов различных жирных кислот в ассоциаты. Разрушение ассоциатов разного состава с различными энергиями координационных связей происходит в строго определенных температурных диапазонах и может быть зафиксировано путем регистрации токового отклика во внешней цепи

при проведении термоактивационной токовой спектроскопии масел.

Заключение

С помощью термоактивационной токовой спектроскопии получена новая информация о популярных разновидностях растительных масел в виде спектров термостимулированных токов, имеющих специфический характер расположения токовых пиков по температурной шкале, свойственный конкретному виду масла. Выбор метода анализа обоснован известными данными о составе масел как диэлектрических объектов, а также предположением об особом характере поведения компонентов масел при нагревании. Предположение о разрушении малостабильных ассоциатов, в которых координационными связями объединены молекулы глицеридов жирных кислот, позволяет интерпретировать экспериментальные данные по специфическому токовому отклику при нагревании образцов масел. Спектры термостимулированных токов масел содержат достаточно интенсивные (порядка 10^{-11} А) токовые пики, расположение которых обусловлено различиями в жирнокислотном составе пальмовых масел. Поэтому факт расположения интенсивных токовых пиков на спектре термостимулированных токов в определенном температурном диапазоне можно рассматривать как экспериментально обоснованный идентификационный признак растительных масел из исследованной группы. В связи с этим термоактивационная токовая спектроскопия может успешно дополнить общепринятые методы анализа растительных масел, в том числе способы определения их состава и обнаружения случаев фальсификации. Применительно к этой задаче термоактивационную токовую спектроскопию следует считать основой для разрабатываемого в ближайшей перспективе тест-метода анализа пищевых продуктов, лежащего на стыке физики конденсированного состояния и аналитической химии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского Фонда фундаментальных исследований.

Список использованных источников

1. *Онищенко, Г.Г.* Система контроля за качеством и безопасностью пищевых продуктов / Г.Г. Онищенко // Пищевая промышленность. – 2011. – № 9. – С. 8–12.
2. *Гороховатский, Ю.А.* Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков / Ю.А. Гороховатский, Г.А. Бордовский. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
3. ГОСТ 25209-82. Пластмассы и пленки полимерные. Методы определения поверхностных зарядов электретов. – М., Госкомитет СССР по стандартам, 1982. – 14 с.
4. *Pinchuk, L.S.* Electret-thermal analysis of polymer blends / L.S. Pinchuk [et al.] // International Polymer Processing. – 2003. – Vol. 18, No. 2. – P. 151–155.
5. *Pinchuk, L.S.* Electret-thermal analysis to assess biodegradation of polymer composites / L.S. Pinchuk [et al.] // International Biodeterioration & iodegradation. – 2004. – Vol. 54, No. 1. – P. 13–18.
6. *Shcherbachenko, L.A.* Electret-thermal and dielectric analyses of electrically active colloids / L.A. Shcherbachenko [et al.] // Technical Physics. – 2010. – Vol. 55, Issue 8. – P. 1209–1215.
7. *Chernyakova, Yu.M.* Tribological and electret-thermal analysis of medicinal preparations for local treatment of joint diseases / Yu.M. Chernyakova [et al.] // Technical Physics. – 2005. – Vol. 50, Issue 5. – P. 648–652.
8. *Pinchuk, L.S.* Electret-thermal analysis of blood. / L.S. Pinchuk [et al.] // Medical Engineering & Physics. – 2002. – Vol. 24, Issue 5. – P. 361–364.
9. *Gaur, M.S.* Thermally Stimulated Current Analysis in Human Blood / M.S. Gaur [et al.] // Trends Biomater. Artif. Organs. – 2007. – Vol. 21, No 1. – P. 8–13.
10. *Кадолич, Ж.В.* Оценка свойств растительных масел методом термоактивационной токовой спектроскопии / Ж.В. Кадолич [и др.] // Масложировая промышленность. – 2013. – № 2. – С. 20–22.
11. *Касторных, М.С.* Товароведение и экспертиза пищевых жиров, молока и молочных продуктов / М.С. Касторных, В.А. Кузьмина, Ю.С. Пучкова. – М.: ИТК «Дашков и К°». – 2009. – 328 с.
12. *О'Брайен, Р.* Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р. О'Брайен; пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 752 с.

EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF IDENTITY FEATURE CHOICE OF PALM OILS

Kadolich Zh.V.¹, Zotov S.V.², Goldade V.A.^{2,3}, Tsvetkova E.A.³, Ovchinnikov K.V.², Ukhartseva I.Yu.¹

¹Belarusian Trade and Economics University of Consumer Cooperatives, Gomel, Belarus

²V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus
Gomel, zotov-1969@mail.ru

³Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus
e-mail: zotov-1969@mail.ru

Abstract. The method of thermally activated current spectroscopy was used for identification of two popular types of palm oils. The spectrum of thermally stimulated currents represents sufficiently intensive (up to 10^{-11} A) current peaks conditioned by differences in fatty-acid composition of oils. Introduction of representation on unstable associates, in which coordination bonds connect molecules of fat acid's glycerides, allow interpret the experimental data about the current response at oil specimens heating. The current's peaks location in a certain temperature range of TSC spectrum can be considered as an identify feature of investigated vegetable oils.

Keywords: thermally activated current spectroscopy, palm oils, thermally stimulated currents, unstable associates, fat acids.

References

1. Onischenko G.G. [The control system for quality and safety of food products]. *Pischevaya promyshlennost*, 2011, no. 9, pp. 8–12 (in Russian).
2. Gorokhovatskiy Yu.A., Bordovskij G.A. *Termoaktivatsionnaya tokovaya spektroskopiya vysokoomnykh poluprovodnikov i dielektrikov* [Thermoactivation current spectroscopy of high-Ohm semiconductors and dielectrics]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 248 p. (in Russian).
3. GOST 25209-82. Plastics and polymer films. Methods of determination of surface charges of electrets. Moscow, USSR State Committee of standards, 1982. 14 p. (in Russian).
4. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Kravtsov A.G., Zotov S.V., Jurkowski B., Kelar K. Electret-thermal analysis of polymer blends. *International Polymer Processing*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 151–155.
5. Pinchuk L.S., Makarevich A.V., Vlasova G.M., Kravtsov A.G., Shapovalov V. Electret-thermal analysis to assess biodegradation of polymer composites. *International Biodeterioration & Iodegradation*, 2004, vol. 54, no 1, pp. 13–18.
6. Shcherbachenko L.A., Borisov V.S., Maksimova N.T., Baryshnikov E.S., Ezhova Ya.V., Karnakov V.A., Marchuk S.D., Eine Yu.T. Electret-thermal and dielectric analyses of electrically active colloids. *Technical Physics*, 2010, vol. 55, issue 8, pp. 1209–1215.
7. Chernyakova Yu., Pinchuk L., Kravtsov A., Kadolich Zh.V., Nikolaev V. Tribological and electret-thermal analysis of medicinal preparations for local treatment of joint diseases. *Technical Physics*, 2005, vol. 50, issue 5, pp. 648–652.
8. Pinchuk L.S., Goldade V.A., Sessler G.M., Kravtsov A.G., Zotov S.V., Tsvetkova E.A. Electret-thermal analysis of blood. *Medical Engineering & Physics*, 2002, vol. 24, issue 5, pp. 361–364.
9. Gaur M.S., Tiwari R.K., Prashant Shukla, Pooja Saxena, Karuna Gaur, Udit Tiwari. Thermally Stimulated Current Analysis in Human Blood. *Trends Biomater. Artif. Organs*, 2007, vol. 21, no 1, pp. 8–13.
10. Kadolich Zh.V., Zotov S.V., Lemeshev S.A., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. [Estimation of properties of vegetable oils by the method of thermoactivation current spectroscopy]. *Maslozhirovaya promyshlennost*, 2013, № 2, pp. 20–22 (in Russian).
11. Kastornyh M.S., Kuzmina V.A., Puchkova Yu.S. *Tovarovedenie i ekspertiza pischevykh zhyrov, moloka i molochnykh produktov* [Science of commodities and examination of food fats, milk and milk products]. Moscow, Dashkov & Co. Publ., 2009, 328 p. (in Russian).
12. O'Brian R. *Zhiry i masla. Proizvodstvo, sostav i svojstva, primeneniye* [Fats and oils. Production, composition and properties, using]. St.Peterburg, Professija Publ., 2007, 752 p. (in Russian, transl. from English).

Поступила в редакцию 12.02.2015.

УДК 621.317.1

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИСТЕМ

Муравьев О.А.¹, Хоминич А.Л.²

¹Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации,
г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: olegmur@yandex.ru

Приведены результаты разработки и использования нестандартизованной методики выполнения измерений параметров приемопередающих модулей широкополосных радиосистем на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза.

Ключевые слова: широкополосные радиосистемы, средства связи, технический регламент Таможенного союза, неопределенность измерений.

Введение

Введение технического регламента Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР ТС 020/2011) [1] создает предпосылки для модернизации существующих испытательных центров, а также созданию новых подходов к проведению испытаний в целях подтверждения соответствия.

Технический регламент содержит обязательные для соблюдения требования к электромагнитной совместимости электротехнических и радиоэлектронных изделий с целью обеспечения их безопасного функционирования при совместном применении. Стандарты, содержащие требования и методы проведения испытаний, в рамках существовавшей ранее Национальной системы подтверждения соответствия были гармонизированы с международными техническими нормативными правовыми актами (ТНПА). Как следствие, разработка нестандартных методов проведения испытаний осуществлялась в случаях отклонения условий проведения испытаний от стандартных и необходимости получения сопоставимых результатов измерений. С введением технических регламентов часть стандартов, гармонизированных с международными, была заменена национальными стандартами стран членов Таможенного союза либо существующими меж-

государственными ТНПА. В части оборудования широкополосного беспроводного доступа в перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 020/2011, были включены государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 52459.17-2009 [2] и государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 1788-2009 [3]. Последний также действует на национальном уровне в рамках решений Государственной комиссии по радиочастотам. В нем установлены требования к электромагнитной совместимости и технические требования к радиооборудованию широкополосного беспроводного доступа, однако, также, как и в [2], не прописана явно методика выполнения измерений (МВИ), что говорит о необходимости проведения работ по данному направлению и разработке собственной МВИ испытательными лабораториями.

В настоящей статье представлены разработанные методы измерений ключевых параметров электромагнитной совместимости приемопередающего оборудования систем широкополосного беспроводного доступа – полосы занимаемых радиосигналом частот, эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) и ее спектральной плотности, позволяющие проводить оценку соответствия устройств, попадающих под область действия стандарта [3]. Также

приведен расчет неопределенности измерений и пример использования МВИ. Описанные в статье методы и подходы могут быть применены при испытаниях оборудования беспроводного широкополосного доступа в рамках требований ТР ТС 020/2011 в особенности при невозможности управления программным обеспечением низкого уровня, используемого в испытуемом устройстве.

1. Методология измерений

Любая методика выполнения измерений требует установки ее назначения и определения основополагающих документов, на основе которых будут построены ее разделы. Для разрабатываемой МВИ основополагающим документом, определяющим технические требования и параметры, является СТБ 1788-2009. Разработка методов измерений, им не определяемых, выполняется с учетом международных ТНПА на соответствующее оборудование – в первую очередь, стандартов IEEE Std 802.11:2007 [4] и ETSI EN 300 328 V1.8.1 [5].

Помимо вышеприведенных документов для правильного построения разделов и использования стандартизированной терминологии должны быть учтены требования ГОСТ 8.010-2013 [6] и ГОСТ 30372-95 [7].

Измерения могут осуществляться двумя методами – кондуктивным и радиационным. В первом случае не требуется специальное экранированное от внешних воздействий помещение («безэховая камера») и достижима более высокая точность измерений. Недостаток кондуктивного метода – необходимость наличия в испытуемом устройстве (ИУ) антенного разъема либо возможности его временной установки. Поскольку современные приемо-передающие модули систем широкополосного беспроводного доступа являются, как правило, встроенными в другое оборудование, оснащенные встроенными антенными системами, антенный разъем в них отсутствует, а его установка затруднительна либо невозможна в принципе. В этом случае применим только радиационный метод, при котором измеряются параметры радиоизлучения ИУ.

Значения погрешности измерений (таблица 1) также определяются [3] и соответствуют международным требованиям, приведенным в [5].

Таблица 1

Значения погрешности измерений

Параметр	Допустимая погрешность измерения
1. Частота	$\pm 1 \times 10^{-5}$
2. Занимаемая полоса частот	$\pm 5,0 \%$
3. Выходная мощность, кондуктивный метод	$\pm 1,5$ дБ
4. Побочные и внеполосные излучения, кондуктивный метод	$\pm 3,0$ дБ
5. Параметры радиоизлучения (все)	$\pm 6,0$ дБ
6. Напряжение питания	$\pm 3,0 \%$
7. Временные характеристики	$\pm 5,0 \%$

Вне зависимости от выбранного метода должны быть учтены возможные изменения параметров оборудования под воздействием окружающей среды. В соответствии с [5], измерения должны проводиться как в нормальных условиях, так и в экстремальных, с использованием комбинаций предельных значений, представленных в таблице 2.

В случае измерений кондуктивным методом используется схема проведения измерений, рекомендуемая в [5, 8], представленная на рисунке 1а. После построения высокочастотного тракта для проведения измерений энергетических величин проводится его калибровка и вычисляется ослабление $A_{вчт}$ между ИУ и средством измерения из выражения:

$$A_{вчт} = A_{НО} + A_{АТТ} + A_{КАБ}, \quad (1)$$

где $A_{НО}$ – ослабление, вносимое направленным ответвителем; $A_{АТТ}$ – ослабление аттенюатора; $A_{КАБ}$ – суммарное ослабление соединительных кабелей и переходников.

При отсутствии информации о параметрах оборудования, использованных в выражении (1), измерение $A_{вчт}$ проводят методом замещения.

Условия проведения измерений

Наименование влияющей величины	Значение	
	Нормальные условия	Экстремальные условия
Температура окружающего воздуха	от +15°C до +35°C	от -20°C до +55°C
Относительная влажность воздуха	от 20 % до 75 %	от 20 % до 75 %
Напряжение электропитания: - при питании от стационарной сети	230 В ± 10 %	230 В ± 10 %
- при питании от свинцово-кислотной батареи транспортного средства	$1,1 \times U_{\text{БАТ.НОМ}} \pm 10 \%$	$U_{\text{БАТ.НОМ}} - 10\%$ $U_{\text{БАТ.НОМ}} + 30\%$
- при питании от литиевой батареи	$U_{\text{БАТ.НОМ}}$	$U_{\text{БАТ.НОМ}} \pm 15 \%$
- при питании от никель-кадмиевой батареи		$U_{\text{БАТ.НОМ}} - 10\%$ $U_{\text{БАТ.НОМ}} + 15\%$
Частота тока питающей сети	50 Гц ± 1 Гц	50 Гц ± 1 Гц

В первом случае измерения энергетических параметров проводят для одного АФТ с последующим расчетом результата измерений с учетом количества АФТ. Неравномерное распределение

мощности между несколькими АФТ требует их объединения при помощи сумматора в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1б [5, 8].

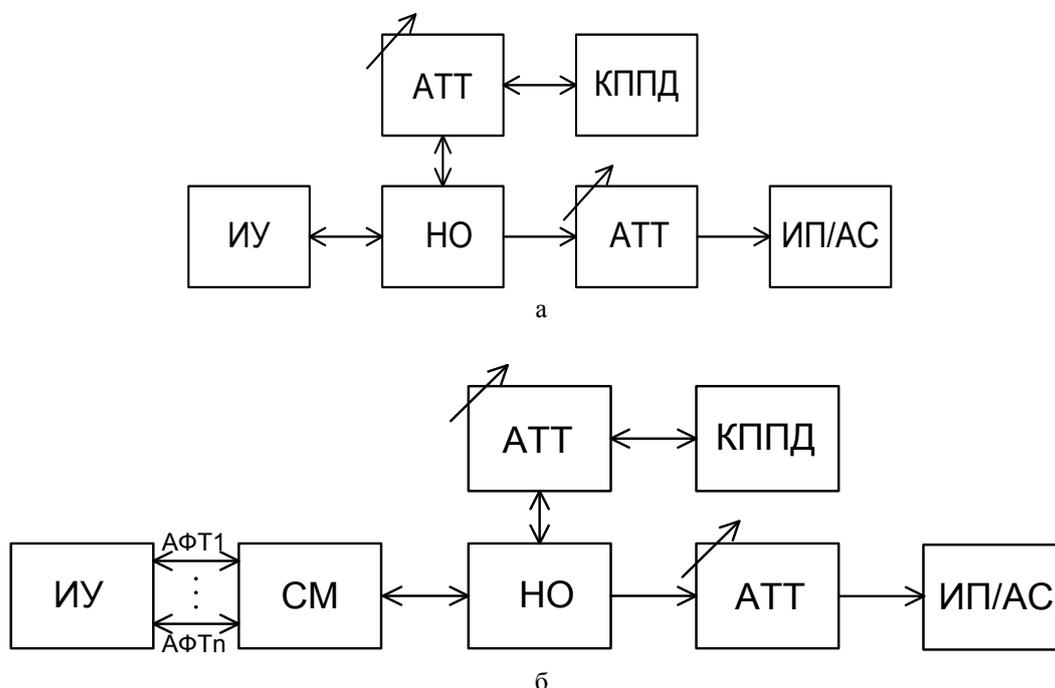


Рисунок 1 – Схема измерения параметров кондуктивным методом:

а – для оборудования с одним антенно-фидерным трактом; б – для оборудования с адаптивной антенной системой и несколькими антенно-фидерными трактами. АТТ – аттенуатор; АФТ – антенно-фидерный тракт;

ИП/АС – измерительный приемник/анализатор спектра; КППД – контрольный приемно-передатчик;

НО – направленный ответвитель; СМ – сумматор

Ослабление A_{CM} , вносимое сумматором, должно быть добавлено к затуханию высокочастотного тракта $A_{вчт}$. Измерение частотных параметров проводится на выходе каждого из АФТ с регистрацией предельных граничных значений.

При отсутствии антенного разъема и невозможности применения кондуктивного метода измерений, измерения проводят радиационным методом в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 2 [8].

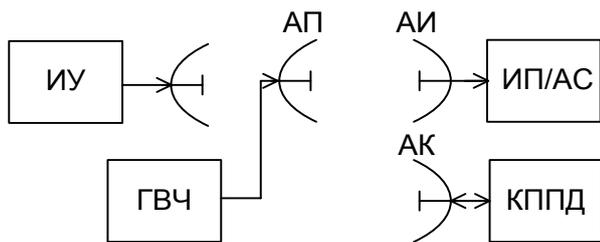


Рисунок 2 – Схема измерения параметров радио-излучения: АИ – антенна измерительная; АК – антенна контрольная; АП – антенна подстановочная; АФТ – антенно-фидерный тракт; ИУ – испытуемое устройство; ГВЧ – генератор высокочастотный; КППД – контрольный прямо-передатчик

Немаловажным этапом подготовки к выполнению измерений является настройка вспомогательного оборудования и обеспечение режимов работы ИУ. Для осуществления данной операции требуется наличие подробной технической документации на испытуемое оборудование, а также возможность работы с программным обеспечением низкого уровня ИУ. Результатом всех подготовительных операций является собранный измерительный тракт (рисунок 1) который обеспечивает непрерывную передачу от ИУ к ИП/АС и КППД испытательной последовательности. Измерения проводят для всех режимов передачи, реализуемых ИУ в соответствии с конструкторско-технической документацией.

2. Валидация методики выполнения измерений

В ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [9] методы испытаний и оценка их пригодности отнесены к факторам, определяющим правильность и надежность испытаний, проводимых лабораторией. В соответствии с требованиями стандарта разработанные или принятые лабораторией методы могут быть использованы, если оценена

их пригодность. Оценка пригодности методики (валидация) подтверждает, что уравнение, которое связывает результат измерения с другими измеренными величинами и указанная совокупность условий, при которых данное уравнение справедливо достаточны для достижения цели измерений.

Проведем валидацию МВИ путем идентификация основных источников неопределенности с их последующим исследованием с помощью диаграмм «причина – следствие» для выяснения как взаимной связи, так и влияния на неопределенность конечного результата.

2.1. Оценка источников неопределенностей и их значений

Проведем оценку неопределенности измерений для схемы измерений, представленной на рисунке 1а. ИУ подключено к измерительному приёмнику (ИП) (измерителю мощности (ИМ)) через направленный ответвитель и аттенуатор 10 дБ коаксиальным кабелем. Номинальная максимальная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) передатчика ИУ составляет 12 дБм.

2.1.1. Измеритель мощности

Измеритель мощности имеет встроенный калибратор. Неопределённость установки уровня калибратора составляет $\pm 1,2 \%$ и имеет равномерное распределение. Стандартная неопределенность:

$$u_{jrt} = \frac{1,2}{\sqrt{3} \times 23,0} = 0,030 \text{ дБ.}$$

Рассогласование при калибровке внутренним калибратором:

Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) источника опорного сигнала – 1,05: $\Gamma_{rs} = 0,024$;

КСВН термодатчика – 1,15: $\Gamma_{load} = 0,07$;

Неопределенность из-за рассогласования составляет:

$$u_{jmi} = \frac{|\Gamma_{gen}| \times |\Gamma_{load}| \times |S_{21}| \times |S_{12}| \times 100\%}{\sqrt{2} \times 11,5}; \quad (2)$$

$$u_{jmr} = \frac{0,024 \times 0,07 \times 100\%}{\sqrt{2} \times 11,5} = 0,010 \text{ дБ.}$$

Коэффициент калибровки: неопределенность коэффициента калибровки составляет $\pm 2,3\%$ от уровня мощности. Стандартная неопределенность u_{jcalf} .

$$u_{jcalf} = \frac{2,3}{\sqrt{3} \times 23,0} = 0,058 \text{ дБ.}$$

Суммарная стандартная неопределенность, вносимая ИМ u_{cms} :

$$u_{cms} = \sqrt{u_{jrl}^2 + u_{jnr}^2 + u_{jcalf}^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,010^2 + 0,058^2} = 0,066 \text{ дБ.}$$

2.1.2. *Аттенюатор, направленный ответвитель и соединяющие кабели*

Исходные данные для оценки неопределенностей, вносимых несовершенством аттенюатора, направленного ответвителя и соединяющих кабелей представлены в таблице 3.

Для снижения КСВН используются аттенюаторы 6 дБ. В первую очередь проводят опорные измерения тракта в соответствии со схемой на рисунке 3. Результатом измерений является калибровочное значение А.

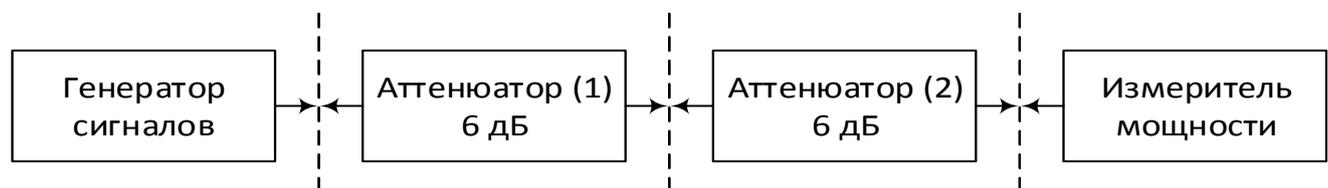


Рисунок 3 – Схема опорных измерений

Стандартные неопределенности, вызванные рассогласованием компонент схемы, приведенной на рисунке 3, могут быть найдены из (2) для следующих комбинаций:

- аттенюатор (1) и (2): $u_{jmat12} = 0,051$ дБ;
- аттенюатор (1) – ИМ: $u_{jmat12} = 0,01$ дБ;
- генератор – аттенюатор (2):

$$u_{jga2} = 0,028 \text{ дБ;}$$

- генератор – ИМ: $u_{jmgps2} = 0,005$ дБ;

Суммарная неопределенность опорных измерений составит:

Таблица 3
Параметры компонент тракта

Устройство	Коэффициент стоячей волны по напряжению	Коэффициент отражения Г
Генератор сигналов	$\leq 1,5$	0,200
Датчик мощности	$\leq 1,15$	0,070
Аттенюаторы 6 дБ	$\leq 1,2$	0,091
Аттенюатор 10 дБ	$\leq 1,3$	0,130
Направленный ответвитель	$\leq 1,25$	0,111
Кабель	$\leq 1,2$	0,091

После чего в тракт включают аттенюатор 10 дБ и получают новое значение ослабления В. Таким же образом измеряют ослабление направленным ответвителем (НО) и получают значение ослабления С. Суммарное ослабление аттенюатора 10 дБ и НО составит $(A - B)$ дБ + $(A - C)$ дБ.

$$u_{cmr} = \sqrt{u_{jmat12}^2 + u_{jga2}^2 + u_{jmat1ps}^2 + u_{jmgps}^2};$$

$$u_{cmr} = \sqrt{0,051^2 + 0,028^2 + 0,010^2 + 0,005^2} = 0,059 \text{ дБ.}$$

Включение в схему кабелей и аттенюатора 10 дБ

Проведя расчёты аналогичные для схемы опорных измерений с учетом неопределённости из-за рассогласования всех комбинаций компонент тракта, представленного на рисунке 4, и включения в тракт соединительного кабеля

и аттенюатора 10 дБ получим следующее значение неопределенности:

$$u_{cm10c} = \sqrt{u_{jmat1c}^2 + \dots + u_{jmgps}^2};$$

$$u_{cm10c} = \sqrt{0,051^2 + 0,073^2 + \dots + 0,001^2 + 0,000^2} = 0,142 \text{ дБ.}$$

С учетом значения неопределенности измерений схемы опорных измерений получаем суммарную неопределенность измерений, источником которой является несовершенство компонент, входящих в состав схемы на рисунке 4:

$$u_{cm10} = \sqrt{u_{jm10c}^2 + u_{cmr}^2} = \sqrt{0,142^2 + 0,059^2} = 0,154 \text{ дБ.}$$

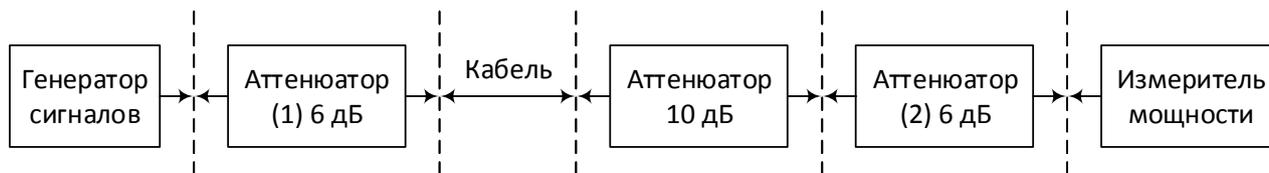


Рисунок 4 – Схема измерений, включающая аттенюатор 10 дБ

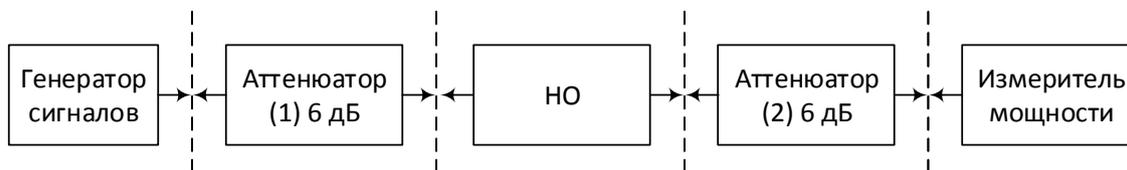


Рисунок 5 – Схема измерений, включающая направленный ответвитель

Аналогично для схемы на рисунке 5 оцениваем вклад НО в неопределенность измерений путем оценки неопределенностей из-за рассогласования между компонентами:

$$u_{cmDC} = \sqrt{u_{jmdCat2}^2 + u_{jmdCat1}^2 + u_{jmgDC}^2 + u_{jmpsDC}^2};$$

$$u_{jmdc} = \sqrt{0,062^2 + 0,062^2 + 0,034^2 + 0,012^2} = 0,095 \text{ дБ.}$$

Суммарная стандартная неопределенность при включении НО в тракт (рисунок 3):

$$u_{cmDC} = \sqrt{u_{jmdc}^2 + u_{cmr}^2} = \sqrt{0,095^2 + 0,059^2} = 0,112 \text{ дБ.}$$

Измерительный приемник:

Линейность измерительного приёмника в соответствии с документацией принимаем равной $\pm 0,04$ дБ, закон распределения равномерный, стандартная неопределенность:

$$u_{jmin} = \frac{0,04}{\sqrt{3}} = 0,023 \text{ дБ.}$$

Неопределённости измерения ослабления тракта:

Суммарная стандартная неопределенность:

$$u_{cate} = \sqrt{u_{c10c}^2 + u_{cdc}^2} = \sqrt{0,156^2 + 0,114^2} = 0,194 \text{ дБ.}$$

2.1.3. Рассогласование в процессе измерений

Из (2) рассчитаем неопределенность путем оценки неопределенностей вызванных рассогласованием между компонентами: u_{jmEc} – испытуемым образцом и коаксиальным кабелем, u_{jmc10} – соединительным кабелем и аттенюатором 10 дБ, u_{jm10DC} – аттенюатором 10 дБ и НО, u_{jmdcPs} – НО и ИМ, u_{jmE10} – испытуемым образцом и аттенюатором 10 дБ, u_{jmcDC} – соединительными кабелями и НО, u_{jmdc} – испытуемым образцом и НО.

Предполагая, что рассчитанные выше величины не коррелированы, получаем суммарную стандартную неопределенность, вызван-

ную рассогласованием компонент тракта при проведении измерений:

$$u_{cm} = \sqrt{u_{jmEc}^2 + u_{jmc10}^2 + \dots + u_{jmcDC}^2 + u_{jmEDC}^2},$$

$$u_{cm} = \sqrt{0,112^2 + 0,073^2 + 0,089^2 + 0,149^2 + 0,058^2 + 0,013^2} = 0,232 \text{ дБ.}$$

2.1.4. Внешние влияющие величины

Оценить влияние неопределенности измерения температуры и напряжения питания на неопределенность измерения уровня сигнала можно из формулы: $u_{jcvd} = \sqrt{u_{jl}^2 (A^2 + u_{ja}^2)}$, где u_{jl} – стандартная неопределенность, влияющая на искомую; A – среднее значение влияющей величины; u_{ja}^2 – ее стандартная неопределенность в соответствии с [10].

Суммарная стандартная неопределенность, вызванная влияющими факторами, составит:

$$u_{jinf} = \sqrt{u_{jpt}^2 + u_{jpv}^2} = \sqrt{0,105^2 + 0,026^2} = 0,108 \text{ дБ.}$$

2.1.5. Расчёт неопределенности по типу А (случайная составляющая)

Проведем серию измерений максимальной ЭИИМ опытного образца стандарта IEEE 802.11g.

Используя схемы измерений, приведенные на рисунках 3–5, определим ослабление $A_{вчт}$ высокочастотного измерительного тракта $A_{вчт} = 12,04$ дБ. Из технической документации находим значение коэффициента усиления антенны, используемой с ИУ, $G_A = 2$ дБи.

Установим максимальную мощность передатчика ИУ и настроим его на верхнюю, а после на нижнюю частоту рабочего диапазона. Зафиксируем большее значение измеренной мощности $P_{изм}$. Для кондуктивного метода измерений значение ЭИИМ вычислим из выражения:

$$\text{ЭИИМ} = P_{изм} + A_{вчт} + G_A.$$

Проведем 9 измерений ЭИИМ и исходя из результатов измерений получаем:

$$u_{eirp} = \sqrt{\frac{Y + \frac{X^2}{n}}{n-1}} = \sqrt{\frac{1342,60 + \frac{12082,41}{9}}{8}} = 0,12 \text{ дБ.}$$

Среднее значение результата измерения:
 $\bar{x} = 12,22$ дБм.

2.1.6. Расширенная неопределенность измерений эквивалентной изотропно излучаемой мощности передатчика

$$u_{eirp} = \sqrt{u_{cms}^2 + u_{catc}^2 + u_{cm}^2 + u_{cinf}^2 + u_{cran}^2};$$

$$u_{eirp} = \sqrt{0,066^2 + 0,194^2 + 0,232^2 + 0,108^2 + 0,12^2} = 0,35 \text{ дБ.}$$

$$U = ku_{eirp} = 1,96 \cdot 0,35 = \pm 0,69 \text{ дБ, } P_D = 95 \text{ \%}.$$

Результат измерения: ЭИИМ = 12,22 ± ± 0,69 дБм, $P_D = 95 \text{ \%}$.

Полученная с использованием предлагаемой МВИ расширенная неопределенность измерений ЭИИМ передатчика удовлетворяет требованиям, предъявляемым в [3, 5], а значение ЭИИМ не превышает приведенных в [3] норм.

Заключение

Разработанная методика выполнения измерений позволяет решить задачу подтверждения соответствия приемопередающего оборудования локальных беспроводных сетей в отсутствии стандартизированной методики выполнения измерений, а также при невозможности управления программным обеспечением низкого уровня, используемого испытуемом устройстве.

Итогом анализа стал расчет расширенной неопределенности измерений энергетических параметров кондуктивным методом, которая составила $U = \pm 0,69$ дБ при доверительной вероятности $P_D = 95 \text{ \%}$. Расчетное значение неопределенности в 2 раза меньше норм, предъявляемых ТНПА (± 1,5 дБ) к точности измерений вышеуказанных параметров.

Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанной методики выполнения измерений в указанной области применения.

Список использованных источников

1. Технический регламент Таможенного союза (ТС) «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР ТС 020/2011).

- ГОСТ Р 52459.17-2009 (EN 301 489-17-2008) «Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства радиосвязи. Часть 17. Частные требования к оборудованию широкополосных систем передачи в диапазоне 2,4 ГГц, высокоскоростных локальных сетей в диапазоне 5 ГГц и широкополосных систем передачи данных в диапазоне 5,8 ГГц».
- СТБ 1788-2009 «Радиосвязь. Оборудование широкополосного беспроводного доступа. Требования к параметрам радиоспектра, электромагнитной совместимости и безопасности».
- IEEE Std 802.11:2007. Information technology telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications.
- ETSI EN 300 328:2006. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using spread spectrum modulation techniques; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive.
- ГОСТ 8.010-2013 ГСИ «Методики выполнения измерений».
- ГОСТ 30372-95 «Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения».
- Alexander, Tom. Optimizing and Testing WLANs. Proven techniques for maximum performance. / By Tom Alexander. 2007 – 259 p.
- ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
- ETSI TR 100 028-2 V1.3.1 (2001-03) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics Part 2.

MODERN MEASUREMENT APPROACHES OF BROADBAND WIRELESS TRANSCEIVER MODULES PARAMETERS

Murauyou A.A.¹, Khaminich A.L.²

¹Belarusian state institute of standardization and certification, Minsk, Belarus

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

e-mail: olegmur@yandex.ru

Abstract. The article contains results of development and use of non-standard methods for measuring parameters of broadband radio transceiver modules for compliance with the technical regulations of the Customs Union.

Keywords: broadband radio systems, communications, technical regulations of the Customs Union, the uncertainty of measurement.

References

- TR CU 020/2011. Technical Regulations of the Customs Union (CU). Electromagnetic compatibility of technical means. 2011. 84 p. (In Russian)
- GOST R 52459.17-2009 (EN 301 489-17-2008). Compatibility of technical equipment. Technical radio communications. Part 17: Particular requirements for equipment broadband transmission systems in the 2.4 GHz band, high-speed local area networks in the 5 GHz band and wideband data transmission systems in the 5.8 GHz band. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 16 p. (In Russian).
- STB 1788-2009. Radio communication. Broadband wireless access equipment. Requirements for the parameters of the radio spectrum, electromagnetic compatibility and safety. Minsk, BELGISS Publ., 2009. 45 p. (In Russian).

4. IEEE Std 802.11:2007. Information technology telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. New York, IEEE Publ., 2013. 1076 p.
5. ETSI EN 300 328:2006. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using spread spectrum modulation techniques; Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive. Route des Lucioles, ETSI Publ., 2006. 42 p.
6. GOST 8.010-2013 GSI Methods of measurement. Minsk, Eurasian Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 2013. 16 p. (In Russian).
7. GOST 30372-95 Compatibility of technical equipment. Terms and definitions. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification Publ., 1995. 19 p. (In Russian).
8. Alexander, Tom. Optimizing and Testing WLANs. Proven techniques for maximum performance. / Tom Alexander. 2007 – 259 p.
9. GOST ISO / IEC 17025-2009 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 36 p. (In Russian).
10. ETSI TR 100 028-2 V1.3.1 (2001-03) Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics Part 2. Route des Lucioles, ETSI Publ., 2001. 277 p.

Поступила в редакцию 07.06.2014.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЗЫ И БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ДВИГАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА

Сотский Н.Б.

Белорусский государственный университет физической культуры,
г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: nsotsky@gmail.com

В статье предлагается оригинальный подход к исследованию физических упражнений, в основе которого лежит измерение параметров, определяющих позу человека, и последующее использование полученной информации для компьютерного синтеза двигательных действий. Предложенный метод позволяет выявлять важнейшие составляющие двигательного действия, такие как элементы осанки и управляющие движения в суставах, строить эффективные методики обучения, совершенствования его исполнения.

Ключевые слова: поза, суставы, компьютерный синтез.

Введение

Поза и ее изменения являются основой двигательной активности человека в ходе его жизнедеятельности. Это относится как к повседневным двигательным действиям, так и к физическим упражнениям, имеющим место в спорте, оздоровительной или лечебной физической культуре [1].

Представления современной биомеханики, связанные с педагогическими аспектами спортивных движений, однозначно указывают на формирование двигательных действий на основе сочетания таких составляющих закона изменения позы, как элементы осанки и управляющие движения в суставах [2]. При этом благодаря элементам осанки создается механизм для пространственных перемещений заданным образом, а управляющие движения выполняют роль энергетического обеспечения двигательного действия.

В работе [3] показана возможность записи и последующего анализа закона изменения позы человека на примере спортивных движений, предложена матричная форма записи позы на основе определения суставных углов учетом анатомических ограничений, связанных с природой опорно-двигательного аппарата человека. В данной работе описаны возможности оценки не только статических поз, но и запись переменной позы, изменение которой происходит в ходе двигательного действия.

Предложенные решения позволяют ставить и решать задачи исследования двигательных действий человека в плане определения роли управляющих движений в суставах при достижении цели физического упражнения. Это позволяет понять принцип формирования физического упражнения, оптимизировать подходы к его освоению, эффективно корректировать двигательные ошибки, создавать технические более совершенные двигательные действия.

В данной статье представлена методика биомеханического компьютерного синтеза двигательных действий, созданная на основе определения и измерения позы, позволяющая в дальнейшем ответить на обозначенные выше вопросы.

Основная часть

Исследование, связанное с биомеханическим компьютерным синтезом предполагает следующие основные этапы:

- фиксация двигательного действия с помощью скоростной видеоаппаратуры;
- разбиение его на фазы и определение цели каждой из фаз (в большинстве двигательных действий это осуществление программ места и ориентации [4]);
- определение и формализация закона изменения позы при его выполнении;
- введение полученного закона в уравнения, выражающие закон движения модели;

– исследование поведения модели при введении различных вариаций в параметры суставных движений.

Первые два из перечисленных этапов биомеханического компьютерного синтеза физического упражнения не имеют прямого отношения к тематике развиваемого направления и к настоящему моменту носят классический характер [4], поэтому в их отношении ограничимся общими замечаниями. Так, фиксация двигательного действия может быть осуществлена любой записывающей аппаратурой с подходящей разрешающей способностью и частотой съемки, адекватной времени выполняемого движения. В частности, при осуществлении исследования вполне может быть использована камера марки *Casio EX-F1* [5] с частотой съемки 300 кадров в секунду. Естественно, имеются и более профессиональные камеры для исследования спортивных движений, в комплект которых входят специальные маркеры, но, на наш взгляд, здесь главной задачей является не столько сверхвысокая точность фиксации параметров, сколько возможность перевода реального исполнения физического упражнения в механико-математическую модель с разумной степенью приближения.

Обработка изображения может быть также произведена как простыми, так и более продвинутыми в технологическом отношении методами. Здесь важно участие педагога-специалиста по исследуемому упражнению. С его помощью устанавливаются границы фаз и цели каждой из них. Аналогичные задачи не сложны, они уже решаются, например, в учебном процессе по биомеханике – предмете, преподаваемой в Белорусском государственном университете физической культуры [6]. В эту исследовательскую методику входит и матричная запись позы спортсмена, выполняющего двигательное действие.

В результате реализации этих этапов у исследователя появляется информация о фазах двигательного действия, их целях и о законе изменения позы в каждой из них. Дальнейшее исследование должно быть связано с выяснением роли суставных движений в ходе компьютерного синтеза фаз двигательного действия.

Формализация закона изменения позы осуществляется в соответствии с разработанной нами ранее методикой [3]. В результате на основании информации о времени суставного движения и амплитуде его выполнения стро-

ится матрица переменной позы, параметры которой являются средствами воздействия на движение модели. Здесь может быть использовано гармоническое приближение закона изменения во времени суставного угла:

$$\Phi_{ijk} = (\Phi_{ijk}^K + \Phi_{ijk}^H) / 2 - (\Phi_{ijk}^K - \Phi_{ijk}^H) \times \cos(\pi t / \tau_{ijk}) / 2, \quad (1)$$

где Φ_{ijk} – суставной угол; Φ_{ijk}^K – конечное значение суставного угла; Φ_{ijk}^H – начальное значение суставного угла; τ_{ijk} – время выполнения суставного движения.

Такое выражение для зависимости суставного угла от времени соответствует плавному нарастанию и плавному убыванию его угловой скорости. Индексы в приведенном выражении слева направо обозначают номер биокинематической цепи, сустав на этой цепи и тип суставного движения. В результате такого представления все интересующие исследователя суставные углы представляются в виде матрицы, каждая ячейка которой представляет собой значение конкретного суставного угла в виде функции времени. Для осуществления следующего этапа исследования необходимо подставить данные об изменении позы в уравнения движения модели тела человека для исследуемой ситуации.

В ходе моделирования можно представить тело человека в виде многозвенной рычажно-шарнирной системы, состоящей из пяти биокинематических цепей, звеньями которых являются твердые цилиндры, а суставы – идеальные сферические шарниры (рисунок 1), допускающие выполнение трех основных суставных движений – циркумдукций, сгибательно-разгибательных и ротаций.

Закон движения такой модели может быть представлен в виде системы из двух векторных уравнений, выражающих законы динамики для поступательного и вращательного движений тела человека.

$$\vec{r}_c'' = \sum \vec{F}_{\text{внеш}}, \quad (2)$$

$$\vec{L}'' = \sum \vec{M}_{\text{внеш}}, \quad (3)$$

где \vec{r}_c – радиус-вектор общего центра масс (ОЦМ) тела; $\vec{F}_{\text{внеш}}$ – внешние силы; \vec{L} – момент импульса относительно ОЦМ, $\vec{M}_{\text{внеш}}$ – внешние моменты сил.

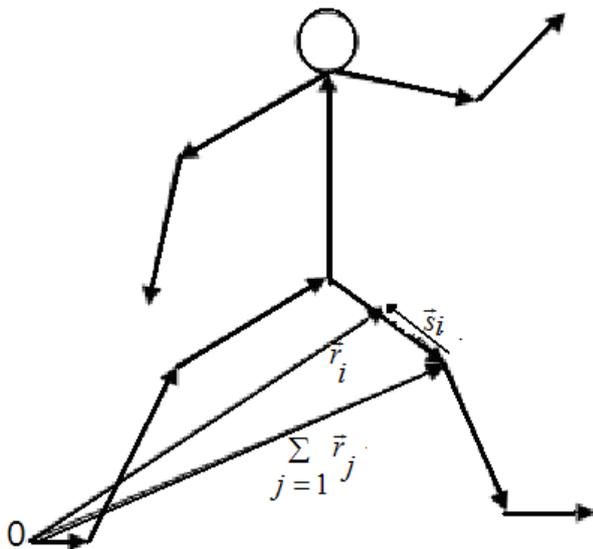


Рисунок 1 – Плоский вариант модели тела человека для компьютерного синтеза

В случае безопорного состояния, имеющего место при выполнении двигательных действий во время фазы полета и при отсутствии учета сопротивления воздуха, что часто бывает оправданным при выполнении упражнений из арсенала спортивной гимнастики или акробатики, к внешним силам относится сила тяжести. Она определяет траекторию ОЦМ. В такой ситуации указанная сила не образует момента относительно ОЦМ, в результате чего момент импульса остается величиной постоянной (выполняется закон сохранения момента импульса).

В рассматриваемых условиях при наличии первоначального момента импульса изменения позы приводят к изменению угловой скорости вращения тела как целого относительно ОЦМ, прямо пропорционально изменению момента инерции. При отсутствии первоначального момента импульса возможны только компенсационные движения.

Например, если руки начали вращаться в одном направлении, тело, как целое, поворачи-

вается в противоположном, обеспечивая равенство нулю суммарного момента импульса.

Таким образом, изменения позы в безопорном состоянии приводят к достаточно очевидным результатам и проведение более глубоких исследований в таком случае не имеет смысла.

Значительно больший интерес представляет биомеханический компьютерный синтез упражнений, выполняемых в контакте с твердой опорой. Его задача – выяснить роль суставных движений в достижении цели двигательного действия с выделением главных и вспомогательных, а также с определением элементов осанки.

Если представить, что контакт с опорой имеет небольшую область, т.е. может считаться точечным, то момент сил трения относительно осей, проходящих через точку контакта, может считаться пренебрежимо малым. В результате остается только одна внешняя сила, которая образует момент относительно точки контакта с опорой. Это сила тяжести.

Закон движения для такой ситуации представляется одним уравнением, которое описывает вращательное движение относительно точки контакта с опорой в форме момента импульса. Данное векторное выражение распадается на систему из трех уравнений по осям координат. В качестве независимых переменных здесь фигурируют три угла Эйлера, образованные опорным звеном и осями неподвижной системы отсчета.

В остальном конфигурация модели (поза) определяется суставными углами, которые задаются действием мышц исполнителя, т.е. являются задаваемыми параметрами. Остальные параметры модели – массы звеньев, положение их центров масс на оси звена, моменты инерции, длины звеньев, время выполнения суставных движений также задаваемы и могут варьироваться.

Если для большей наглядности рассмотреть случай плоского движения, например отталкивания при выполнении прыжка в длину с разбега, закон движения будет представляться следующим уравнением:

$$L'_z = \sum_{i=1}^{i=N} (m_i (x_i y''_i - x''_i y_i) + J_i \omega'_i) = M_{\text{тяж}} \tag{4}$$

где L'_z – момент количества движения модели тела относительно точки контакта с опорой;

$m_i, x_i, y_i, y''_i, x''_i, J_i, \omega'_i, M_{\text{тяж}}$ – соответственно параметры звена с номером i : масса, горизонтальная и вертикальная координаты центра масс, аналогичные компоненты ускорения центра масс, момент инерции относительно центра масс, угловое ускорение, момент силы тяжести относительно оси, проходящей через точку контакта с опорой.

Если учесть, что начало каждого звена модели совпадает с концом предыдущего звена, модель можно представить в виде совокупности биокинематических цепей с двумя разветвлениями, одно из которых находится на уровне тазобедренных суставов, а второе – на уровне плечевых.

В данной ситуации радиус-вектор \vec{r}_i центра масс звена с номером i может быть представлен в виде суммы векторов, представляющих звенья тела от точки контакта с опорой до рассматриваемого звена, из которой вычитается вектор \vec{s}_i , проведенный из конца звена в его центр масс (рисунок 1):

$$\vec{r}_i = \sum_{j=1}^i \vec{r}_j - \vec{s}_i, \quad (5)$$

Для используемой системы координат, начало которой совпадает с точкой контакта с опорой, горизонтальная и вертикальная координаты выражаются через алгебраическую сумму проекций соответствующих векторов. Так, координаты центра масс звена с номером i могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} X_i &= \sum_{j=1}^{j=i} -l_j \sin \varphi_j + s_j \cos \varphi_j, \\ Y_i &= \sum_{j=1}^{j=i} l_j \cos \varphi_j - s_j \cos \varphi_j. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует также учесть, что угол пространственной ориентации φ_i i -го звена определя-

ется углом, образованным первым звеном с осью системы отсчета, и суммой суставных углов звеньев, расположенных по цепи ближе к началу системы координат:

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{j=1}^{j=i} \alpha_j. \quad (7)$$

Линейные скорости и ускорения центра масс (ЦМ) звеньев, угловых скоростей и ускорений звеньев определяются дифференцированием по времени выражений (7), (8). Правая часть уравнения движения модели содержит момент силы тяжести, который определяется произведением величины силы тяжести на ее плечо относительно выбранного начала координат. Указанным плечом является горизонтальная координата ОЦМ. Она зависит от координат ЦМ звеньев, а те, в свою очередь, зависят от их длин и углов их ориентации в пространстве, которые определяются суставными углами и единственным углом между осью системы отсчета и опорным звеном.

В результате, если задать закон изменения позы (суставных углов), уравнение движения будет обладать одной независимой переменной – углом, образованным опорным звеном и осью системы отсчета.

Данное дифференциальное уравнение имеет единственное решение, которое полностью определяет то, как будет двигаться модель при различных начальных условиях, которые представляют собой угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета, а также угловую скорость изменения этого угла в начальный момент времени.

Таким образом, количество задаваемых переменных в модели биомеханического синтеза составляют: массы и моменты инерции звеньев (22), длины звеньев и расстояния от начала звена до его центра масс (22), время выполнения суставных движений (10), начальное и конечное положение в суставе (20), начальные условия (2) и одна независимая переменная.

Всего в ходе исследования при использовании рассматриваемой модели могут варьироваться 76 параметров.

При расчете координат центров масс звеньев использовано последовательное перечисление звеньев тела как векторов. В связи с этим для эффективного функционирования модели

была построена матрица, позволяющая учесть разветвления цепей. Она имеет вид:

$$\Delta(i, k) = \{1 - (\delta(i,7) + \delta(i,8) + \delta(i,9) + \delta(i,10) + \delta(i,11))[(\delta(k,4) + \delta(k,5) + \delta(k,6))] \} \{1 - [\delta(i,10) + \delta(i,11)][\delta(k,8) + \delta(k,9)]\}, \quad (8)$$

где $\delta(i, k)$ – символ Кронекера.

Данная матрица в явном виде выглядит следующим образом:

$$\Delta(i, k) = \begin{bmatrix} 1111111111 \\ 1111111111 \\ 1111111111 \\ 1111111111 \\ 1111111111 \\ 1111111111 \\ 1110001111 \\ 1110001111 \\ 1110001111 \\ 1110001001 \\ 1110001001 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Использование матрицы позволяет определять углы пространственной ориентации путем последовательного суммирования угла пространственной ориентации опорного звена и суставных углов с исключением повторного учета цепей в точках разветвления. В результате использования матрицы формула (7) преобразуется к виду:

$$\varphi_i = \varphi_1 + \sum_{k=1}^{k=i} \alpha_j \Delta(i, k) . \quad (10)$$

Дифференцирование данного выражения позволяет определить угловые скорости и ускорения при изменении углов пространственной ориентации звеньев модели. Аналогично дифференцирование выражений (6) позволяет представить через углы пространственной ориентации звеньев скорости и ускорения центров масс звеньев, фигурирующих в законе движения модели.

В результате, если задать указанные выше исходные данные, начальные условия и закон изменения позы (суставных углов), в уравнении

движения остается одна независимая переменная – угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета. Данное дифференциальное уравнение имеет единственное решение, которое полностью определяет то, как будет двигаться модель при различных начальных условиях, которые представляют собой угол, образованный опорным звеном и осью системы отсчета, а также угловую скорость изменения этого угла в начальный момент времени. Конкретное решение указанного дифференциального уравнения может быть осуществлено численным интегрированием, например, с использованием процедуры Рунге–Кутты [7].

Подстановка исходных данных, а также экспериментально полученных параметров реального физического упражнения позволяет получить синтезированное двигательное действие, которое может быть изменено варьированием любых параметров, входящих в уравнение движения модели. Здесь появляется возможность исследования влияния суставных движений и антропометрических данных на особенности достижения цели двигательного действия, определять возможности педагогического воздействия при освоении упражнения и совершенствования техники его исполнения.

Практическая реализация биомеханического синтеза двигательного действия для рассматриваемого плоскостного варианта физического упражнения с учетом рассмотренных особенностей была осуществлена в результате построения специальной программы на языке *Visual Basic*.

Окно ввода и вывода данных показано на рисунке 2, в левой части которого представляются данные моделирования, в данном случае скорость ОЦМ, в центре – контурограмма синтезируемого двигательного действия, а в правой части – шаг решения, начальные условия и параметры суставных движений.

При использовании построенной методики могут проводиться различные исследования.

В частности, при введении вариаций в параметры суставных движений может быть определена роль последних в достижении цели двигательного действия, выявлены основные составляющие физического упражнения – элементы осанки и управляющие движения, определено влияние антропометрических характеристик тела исполнителя, начального положения и скорости, влияния силы тяжести и многие другие задачи.

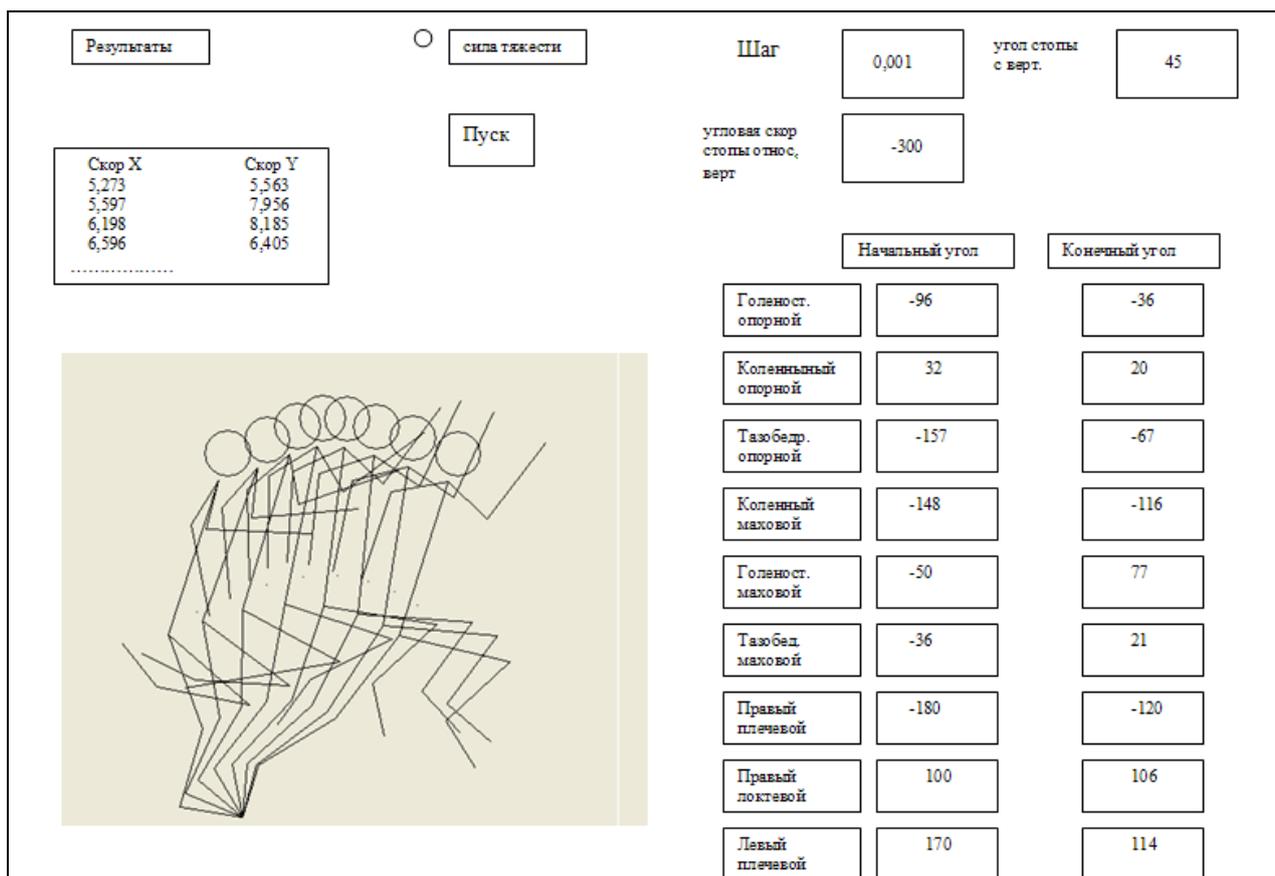


Рисунок 2 – Диалоговое окно программы биомеханического компьютерного синтеза двигательного действия

Заключение

Измерение и запись позы человека позволяют построить методику исследования его двигательных действий, представляющую собой биомеханический компьютерный синтез физического упражнения на основе информации о параметрах реальных суставных движений, имеющих место при его выполнении.

Особенностью моделирования в данном случае является оставление в неявном виде информации о силах и моментах сил, имеющих место в сочленениях при выполнении двигательного действия. Предполагается, что исполнитель контролирует не силы, а кинематику управляющих движений в суставах, что соответствует современным подходам в биомеханике физических упражнений.

Конкретное представление модели в плоском случае имеет 76 параметров, вариации которых позволяют понять механизм осуществления двигательного действия, выявить элементы осанки, главные и вспомогательных

управляющие движения в суставах, являющиеся объектом педагогического воздействия при освоении физического упражнения, его совершенствовании, оптимизации развития специальных физических качеств.

Список использованных источников

1. *Курьсь, В.Н.* Биомеханика. Познавание телесно-двигательного упражнения : учеб. пособие / В.Н. Курьсь. – М. : Советский спорт, 2013. – 368 с.
2. *Назаров, В.Т.* Движения спортсмена / В.Т. Назаров. – Минск : Полымя, 1984. – 176 с.
3. *Сотский, Н.Б.* Поза спортсмена: Определение и измерение / Н.Б. Сотский // Метрология и приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 37–40.
4. *Сотский, Н.Б.* Биомеханика : учебник для студ. спец-ти «Спорт.-пед. деятельность» / Н.Б. Сотский. – Минск : БГУФК, 2005. – 192 с.
5. *Крупский, Д.* Обзоры фототехники / Д. Крупский [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.kroupski.ru/photo/casio-exilim-pro-ex-fl.htm>. – Дата доступа: 23.02.2015.

6. Сотский, Н.Б. Практикум по биомеханике: практикум / Н.Б. Сотский, В.Ю. Екимов, В.К. Пономаренко. – Минск : БГУФК, 2014. – 108 с.

7. Бахвалов, Н.С. Численные методы: учеб. пособие / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М. : Наука, 1987. – 600 с.

POSTURE MEASUREMENT AND BIOMECHANICAL COMPUTER SYNTHESIS OF HUMAN MOTIONS

Sotsky N.B.

The Belarus State University of Physical Culture, Minsk, Belarus
e-mail: nsotsky@gmail.com

Abstract. The paper proposes a novel approach to the study of physical exercise, which has at its core measurement parameters determining the pose of a man, and then use this information as a basis for computer synthesis of motor actions. The proposed method makes it possible to identify the major components of motor actions, such as the elements of posture and movement control joints, build effective teaching methods, improving its performance.

Keywords: posture, joints, computer synthesis.

References

1. Kuris V.N. *Biomekhanika. Poznanie telesno-dvigatel'nogo upraznenija* [Study of body-motor exercises]. Moscow, Sovetski sport Publ, 2013, 368 p. (in Russian).
2. Nazarov V.T. *Dvizheniya sportsmena* [Movements of the sportsman]. Minsk, Polymja Publ., 1984, 176 p. (in Russian).
3. Sotsky N.B. [Pose of the sportsman: Definition and measurement]. *Metrologiya i mashinostroyeniye*. 2014, № 2, pp. 37–40 (in Russian).
4. Sotsky N.B. *Biomekhanika* [Biomechanics] Minsk, BGUFK Publ, 2005, 192 p. (in Russian).
5. Krupskij D. *Obzory fototekhniki*. [Overview of photographic equipment] Available at: <http://www.kroupski.ru/photo/casio-exilim-pro-ex-fl.htm> (accessed 23.02.2015) (in Russian).
6. Sotsky N.B., Ekimov V.U., Ponomarenko V.K. *Praktikum po biomekhanike* [Workshop on biomechanics] Minsk, BGUFK Publ, 2014, 108 p. (in Russian).
7. Bahvalov N.S., Zidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical methods] Moscow, Nauka Publ, 1987, 600 p, (in Russian).

Поступила в редакцию 24.02.2015.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертаций», утвержденной постановлением президиума государственной ВАК РФ от 24.12.1997 г. № 178 (в редакции с изменениями и дополнениями постановления ВАК РФ от 22.02.2006 г. № 2 и постановления ВАК РФ от 15.08.2007 г. № 4).

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языках и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном виде в двух экземплярах и в электронном виде в формате текстового редактора **Word for Windows (97/2000/2003)**.

5. В статье указываются: индекс УДК, название статьи, напечатанное прописными буквами, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой), наименования организаций, в которых работают авторы. Статья должна включать в себя: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (не более пяти), введение, основную часть, заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения, список использованных источников. В структуру (при необходимости) может быть включен перечень обозначений и сокращений. Аннотация, ключевые слова, название статьи, фамилии авторов и наименования организаций, в которых они работают, представляются на английском и русском языках.

6. Объем статьи не должен превышать 8-ми страниц машинописного текста (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1,5).

7. Рисунки создаются **черно-белыми** в одном из графических редакторов (формат tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), вставляются в конце статьи с помощью табличного процессора «Excel» или «MS Graph» (встроенного в «Word») и сопровождаются подрисуночной подписью. Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы.

8. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи и не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте и, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation

Editor, выровнены по центру, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Отдельные строчные греческие и иные специальные символы (например, математические) набираются в тексте статьи гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **прямо** набираются греческие и русские буквы, математические символы, символы химических элементов, индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращением слов; **курсивом** набираются латинские буквы – переменные, символы физических величин (в том числе и в индексе); **жирным** шрифтом набираются векторы (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников приводится в конце статьи и должен содержать полные библиографические данные. Список составляется в порядке упоминания ссылок по тексту. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес для переписки, номера телефонов, факсимильной и 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.

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.

Индексы :
74835; 748352