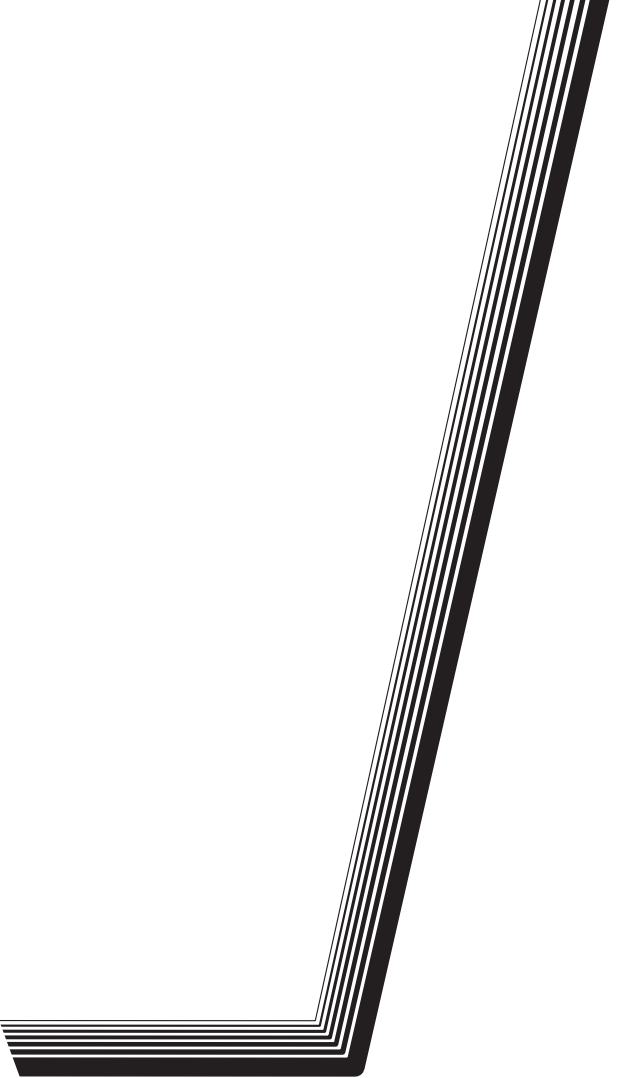


ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Том 16, № 3

Красноярск 2015

ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева (Вестник СибГАУ)

Том 16, № 3

Главный редактор

Ковалев Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора

Логинов Юрий Юрьевич, доктор
физико-математических наук, профессор

Сенашов Сергей Иванович, доктор
физико-математических наук, профессор

Мурыгин Александр Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь

Зеленков Павел Викторович, кандидат
технических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин С. С., доктор физико-математических
наук, профессор

Головенкин Е. Н., доктор технических наук,
профессор

Ерыгин Ю. В., доктор экономических наук,
профессор

Лаптенко В. Д., доктор технических наук,
профессор

Ловчиков А. Н., доктор технических наук,
профессор

Медведев А. В., доктор технических наук,
профессор

Михеев А. Е., доктор технических наук,
профессор

Москвичев В. В., доктор технических наук,
профессор

Сафонов К. В., доктор физико-математических
наук, доцент

Смирнов Н. А., доктор технических наук,
профессор

Сомов В. Г., доктор технических наук,
доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор физико-
математических наук, профессор (Москва)

Дегерменджи А. Г., академик РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Дегтерев А. С., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Калвода Л., кандидат наук, доцент
(Прага, Чехия)

Колмыков В. А., кандидат технических наук,
профессор (Красноярск)

Краточилова И., доктор, доцент (Прага, Чехия)

Краус И., профессор (Прага, Чехия)

Лопатин А. В., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Лю Т., профессор (Пекин, Китай)

Минкер В., доктор, профессор (Ульм, Германия)

Миронов В. Л., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Младенов Г., член-корреспондент Болгарской
академии наук, доктор физических наук, профессор
(София, Болгария)

Павера Р., доцент (Братислава, Словакия)

Семенкин Е. С., доктор технических наук,
профессор (Красноярск)

Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
(Железногорск)

Ужуле К., доктор (Рига, Латвия)

Фошнер М., доктор, доцент (Марибор, Словения)

Чжанг Ш., доктор (Тяньцзинь, Китай)

Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор физико-
математических наук, профессор (Красноярск)

Шайдуров В. В., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор (Красноярск)

Швиденко А., доктор инженерных наук,
профессор (Лаксембург, Австрия)

Эйя Х., доктор инженерных наук,
профессор (Тронхейм, Норвегия)

VESTNIK

Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta
imeni akademika M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)

Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems

Vol. 16, No 3

Chief Editor:

Kovalev I. V.

Dr.Sc., Professor

Deputy Chief Editors

Loginov Y. Y., Dr.Sc., Professor

Senashov S. I., Dr.Sc., Professor

Murygin A. V., Dr.Sc., Professor

Executive Secretary

Zelenkov P. V., Cand.Sc.

EDITORIAL BOARD

Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor

Golovenkin E. N., Dr.Sc., Professor

Erygin Y. V., Dr.Sc., Professor

Laptenok V. D., Dr.Sc., Professor

Lovchikov A. N., Dr.Sc., Professor

Medvedev A. V., Dr.Sc., Professor

Mikheev A. E., Dr.Sc., Professor

Moskvichev V. V., Dr.Sc., Professor

Safonov K. V., Dr.Sc., Docent

Smirnov N. A., Dr.Sc., Professor

Somov V. G., Dr.Sc., Docent

EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev S. N., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Moscow)

Degermendzhi A. G., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Degterev A. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Kalvoda L., Cand.Sc.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)

Kolmykov V. A., Cand.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Kratochvilova I., Dr.-Ing., Associate Professor (Prague, Czech Republic)

Kraus I., Sc.D., Professor (Prague, Czech Republic)

Lopatin A. V., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Liu T., Ph.D., Professor (Beijing, China)

Minker W., Dr.-Ing., Professor (Ulm, Germany)

Mironov V. L., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Mladenov G., Corresponding Member of Bulgarian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Sofia, Bulgaria)

Pawera R., Associate Professor (Bratislava, Slovakia)

Semenkin E. S., Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Testoedov N. A., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Zheleznogorsk)

Užule K., Ph.D. (Riga, Latvia)

Fošner M., Ph.D. Associate Professor (Maribor, Slovenia)

Zhang S., Ph.D. (Tianjin, China)

Shabanov V. F., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Shaidurov V. V., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc., Professor (Krasnoyarsk)

Shvidenko A., Dr.-Ing., Professor (Laxenburg, Austria)

Oye H., Dr.-Ing., Professor (Trondheim, Norway)

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник СибГАУ» является научным, производственно-практическим рецензируемым изданием. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ–ФС77-22189 от 27.10.2005 г. ISSN 1816-9724. Подписные индексы в каталогах «Роспечать» – 11399; «Пресса России» – 39263.

Входит в перечень журналов ВАК.

Зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Включен в базу данных Ulrich's Periodicals Directory американского издательства Bowker.

Выпускается с 2000 года. До 2002 года носил название «Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева» («Вестник САА»).

Журнал публикует результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам:

- проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники;
- космического машиностроения;
- управления, вычислительной техники, информатики аэрокосмической отрасли;
- отраслевой экономики.

Каждый выпуск включает четыре раздела:

- 1 раздел. Математика, механика, информатика.
- 2 раздел. Авиационная и ракетно-космическая техника.
- 3 раздел. Технологические процессы и материалы.
- 4 раздел. Экономика.

Статьи публикуются бесплатно после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru). Журнал выходит 4 раза в год. Специальный выпуск – 1 раз в год.

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>) и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна.

Учредитель и издатель

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГАУ)

АДРЕС РЕДАКЦИИ, УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ:

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева,
Российская Федерация, 660037, Красноярск,
проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31, П-416.
Тел./ факс (391)291-90-19
E-mail: vestnik@sibsau.ru

Редактор: О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка О. В. Булатниковой

Подписано в печать 18.09.2015. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 31,2.

Уч.-изд. л. 37,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/232. С 162/15.

Редакционно-издательский отдел Сиб. гос.

аэрокосмич. ун-та. 660037, г. Красноярск,

просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Отпечатано в типографии ИП Михайловой И. Г.

660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 6в-69.

Дата выхода в свет: 23.10.2015. Свободная цена

INFORMATION FOR AUTHORS AND SUBSCRIBERS

Vestnik SibGAU is a research, production and practical peer-reviewed journal. Included by the Higher Attestation Commission of the Russian Federation in the Index of Leading Russian Peer-Reviewed Journals and Periodicals, in which significant scientific dissertation results should be published when applying for a Dr.Sc. degree.

Vestnik SibGAU is the official periodical of Siberian State Aerospace University (SibSAU)

The journal holds a Certificate of Registration as a Mass Media Resource. Certificate (Cyrillic): PI No. FC 77-22189, dated 27 October 2005.

The Journal is included in the following subscription catalogues:

1. 11399 – Rospechat'
2. 39263 – Pressa Rossii

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal is indexed in the database of Ulrich's Periodicals Directory.

The journal was first published in 2000. Prior to 2002 it had the title *Vestnik Sibirskoi aerokosmicheskoi akademii imeni akademika M. F. Reshetneva* (*Vestnik SAA*).

Vestnik SibGAU is a scientific journal which reviews and publishes results of research in the field of natural and applied sciences and engineering. The main topics of the journal are:

- design, production, and operation of aircraft and spacecraft;
- aerospace engineering;
- management, computer technology, applied informatics in the aerospace industry;
- applied economics.

Each issue consists of four parts:

Part 1. Mathematics, Mechanics, Computer Science.

Part 2. Aviation and Spacecraft Engineering.

Part 3. Technological Processes and Material Science.

Part 4. Economics Aerospace Industry.

Papers prepared in accordance with the editorial guidelines (www.vestnik.sibsau.ru) are published free of charge after being peer reviewed.

There are four issues every year with an additional special issue, which is published once a year.

An online version of *Vestnik SibGAU* can be viewed at <http://www.elibrary.ru>

Vestnik SiGAU should be cited when reprinting or citing materials from the journal.

CONTACTS: *Vestnik SibGAU* website: www.vestnik.sibsau.ru

Address: Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation. Tel./fax (391)291-90-19; e-mail: vestnik@sibsau.ru

Editor O. A. PLEKHOVA

Editor (English Language) S. G. EFA

Layout original O. V. BULATNIKOVA

Signed (for printing): 18.09.2015. Format 70×108/16.

Offset Paper. Print flat. 31,2. Published sheets 37,0.

1000 copies. Order 87/232. C 162/15.

Printing and Publication Department

Reshetnev Siberian State Aerospace University.

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037.

Printed in the printing house of I. G. Mikhailova

6в-69, Vodopyanova Str., Krasnoyarsk, 660125.

Date of publication: 23.10.2015. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Алешечкин А. М., Феоктистов Д. С. Направления модернизации аппаратной части и программного обеспечения радионавигационной системы «Крабик-БМ»	546
Анискович Е. В., Середин В. И. Определение характеристик механических свойств материалов металлокомпозитного ксенонового бака высокого давления	554
Банникова А. В., Корнеева А. А. Об управлении безынерционными дискретно-непрерывными процессами с запаздыванием	560
Браништи В. В. Некоторые обобщения метода моментов при оценивании плотности вероятности в виде ортогонального ряда	566
Жуков В. Г., Шаляпин А. А., Соколов М. М. Исследование алгоритма прецедентного анализа в задаче классификации инцидентов информационной безопасности	572
Иванов В. А., Еркаев Н. В. Моделирование нестационарного контакта в подшипнике качения	580
Картушинский А. В., Кукоба Н. А. Изучение градиентных полей поверхности Земли по спутниковым данным	587
Мамдух Мохаммед Гомаа. Новый экспресс-метод для обнаружения лица	597
Мангалова Е. С., Шестернева О. В. О последовательном построении непараметрических оценок регрессии	604
Пронина Е. А., Шлепки А. А. Группы Шункова, насыщенные группами $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$	611
Сенашов В. И. Группы Шункова	618
Шайдуров В. В. Магнитные эффекты тунгусских событий 1908 года	624
Шумакова Н. А. Применение информационных технологий для реализации интегрированных методик при обучении английскому языку для научных целей специалистов аэрокосмического профиля	632

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Автономов Н. Н., Тололо А. В. Влияние осевой деформации шара на величину измеряемой глубины вдавливания шара по перемещению верхней точки шара	638
Вайнштейн И. И., Михальченко Г. Е., Вайнштейн Ю. В., Сафонов К. В. О выборе стратегий эксплуатации технических систем	645
Веселков С. А., Горбатьюк Е. О., Кузакова Н. М., Заварзина А. В. Расчет оптической системы для инфракрасного диапазона спектра, используемой для обнаружения малоразмерных очагов пожаров с геостационарной орбиты	651
Двирный В. В., Еременко Н. В., Двирный Г. В. Уменьшение массы кабельной продукции для космических аппаратов	658
Серенков В. И., Карцан И. Н., Дмитриев Д. Д. Метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны	664
Федченко Д. А., Синицкий Д. Е. Решение задач наземной экспериментальной отработки системы ориентации и стабилизации космических аппаратов с применением трехосного имитатора движения	670
Финогенов С. Л., Коломенцев А. И., Кудрин О. И. Использование различных окислителей для дожигания водорода, нагреваемого в ракетном двигателе за счет солнечной энергии	680
Хоменко И. И., Раводина Д. В., Михеев А. Е., Ереско Т. Т., Ереско С. П. Метод изготовления волновода с токопроводящим вакуумным покрытием	690

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Аплеснин С. С., Харьков А. М. Магнитоёмкостные эффекты в твердых растворах $Yb_xMn_{1-x}S$	696
Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Влияние распределения контактных напряжений на утечки через торцевое уплотнение	705
Бусыгин С. Л., Токмин А. М., Богданов В. В., Готовко С. А. Способ изготовления электродов контактной сварки совмещенным способом литья и штамповки	714
Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Сравнительный анализ конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей	720

Ковалева Е. А., Кузубов А. А., Куклин А. В., Михалев Ю. Г., Попов З. И. Квантово-химическое исследование атомной и электронной структуры интерфейсов LSMO с углеродными нанотрубками различной хиральности	729
Крушенко Г. Г. Технология изготовления и сварка конструкций из алюминиевых сплавов электродами, содержащими нанопорошки.....	735
Кузубов А. А., Михалева Н. С., Попов З. И., Краснов П. О., Николаева К. М. Теоретическое исследование влияния допирования поверхности Si (100) на сорбцию и диффузию лития	743
Лепешев А. А., Карпов И. В., Ушаков А. В., Зеленков П. В., Федоров Л. Ю. Свойства квазикристаллических Al-Cu-Fe-покрытий, приготовленных плазменным распылением	750
Телегин С. В., Саунин В. Н., Чесноков Е. Я. Определение длины свободного пробега частиц бета-распада в порошковых материалах	758
Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., Федоров Л. Ю., Шайхадинов А. А. Исследование влияния наночастиц ZrO ₂ плазмохимического синтеза на пиннинг магнитного потока в гранулярных YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y}	763
Фельк В. А., Ерошенко П. Е. Микромагнитное моделирование основного состояния ферромагнитных наноточек с одноосной анизотропией	770
Шестаков И. Я., Раева О. В. Влияние напряженности электрического поля на границе раздела фаз на степень очистки воды от ионов металлов	776

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Ерыгин Ю. В., Беляков Р. А. Определение коммерческого потенциала и цены инновационной технологии	782
Ощепкова Д. С. Человеческий капитал как фактор экономического развития аэрокосмической отрасли	787
Подвербных О. Е., Санданова Б. Д. Классификация источников инноваций в оборонно-промышленном комплексе	792
Сведения об авторах	797

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Aleshechkin A. M., Feoktistov D. S. Modernization directions of the hardware and software of “Krabik-BM” radio navigation system.....	546
Aniskovich E. V., Seredin V. I. Determination of mechanical properties of materials of high pressure metal-xenon tank.....	554
Bannikova A. V., Korneeva A. A. About control of inertia less discrete-continuous processes with retardation	560
Branishti V. V. Some generalizations of method of moments in probability density estimation by orthogonal series.....	566
Zhukov V. G., Shalyapin A. A., Sokolov M. M. Research of the case analysis algorithm in the classification of problem of information security incidents	572
Ivanov V. A., Erkaev N. V. Simulation of non-steady contact in rolling bearings	580
Kartushinsky A. V., Kukoba N. A. Investigation of gradient fields of the Earth surface based on satellite data.....	587
Mamdouh M. Gomaa. A new fast face detection technique.....	597
Mangalova E. S., Shesterneva O. V. About boosted learning of nonparametric estimators	604
Pronina E. A., Shlepkina A. A. Shunkov groups, saturated by groups $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$	611
Senashov V. I. Shunkov groups	618
Shaydurov V. V. The magnetic effects of the Tunguska events in 1908	624
Shumakova N. A. Use of information technologies for implementation of integrated methods in teaching aerospace specialists English for scientific purposes.....	632

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Avtonomov N. N., Tololo A. V. Axial ball strain influence on measurable value of ball indentation by top point of ball	638
Vainshtein I. I., Mihalchenko G. E., Vainshtein J. V., Safonov K. V. About the choice of strategy of technical systems operation.....	645
Veselkov S. A., Gorbatyuk E. O., Kuzakova N. M., Zavarzina A. V. Calculation of optical systems for the infrared spectral range used for the detection of small pockets of fire from geostationary orbit.....	651
Dvirnyi V. V., Eremenko N. V., Dvirnyi G. V. Reduction of spacecraft harness mass	658
Serenkov V. I., Kartsan I. N., Dmitriev D. D. Method for the synthesis of amplitude-phase distribution of hybrid-mirror download.....	664
Fedchenko D. A., Sinitskiy D. E. Onground testing of satellite attitude determination and control system with three-axis motion simulator.....	670
Finogenov S. L., Kolomentsev A. I., Kudrin O. I. Use of different oxidizers for afterburning of hydrogen heated by solar energy in rocket engine	680
Khomenko I. I., Ravodina D. V., Mikheev A. E., Eresko T. T., Eresko S. P. Method of waveguides with conductive vacuum coating fabrication	690

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Aplesnin S. S., Kharkov A. M. Magnetocapacitive effects in solid solutions $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$	696
Asheichik A. A., Polonsky V. L. Influence of distribution of contact pressure on leakage through casket	705
Busygin S. L., Tokmin A. M., Bogdanov V. V., Gotovko S. A. A method of resistance welding electrodes manufacturing by combined casting and stamping	714
Eresko S. P., Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovschikov V. A. Comparative analysis of universal joint structures of unequal angular velocity.....	720
Kovaleva E. A., Kuzubov A. A., Kuklin A. V., Mikhalev Yu. G., Popov Z. I. Atomic and electronic structure of CNT/LSMO-based nanocomposites: a DFT study	729
Krushenko G. G. Manufacturing technology and welding of aluminum alloys electrodes containing nanopowders.....	735
Kuzubov A. A., Mikhaleva N. S., Popov Z. I., Krasnov P. O., Nikoleva K. M. Theoretical study of Si (100) doping influence on lithium sorption and diffusion.....	743

Lepeshev A. A., Karpov I. V., Ushakov A. V., Zelenkov P. V., Fedorov L. Yu.	
Properties of quasicrystalline Al-Cu-Fe coatings prepared by plasma spraying	750
Telegin S. V., Saunin V. N., Chesnokov E. Ya. Determination of particle mean free path beta decay in the particulate material	758
Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Shaihadinov A. A.	
Influence of plasma synthesis of ZrO ₂ nanoparticles on magnetic flux pinning in granular YBa ₂ Cu ₃ O _{7-y}	763
Fel'k V. A., Eroshenko P. E. Micromagnetic simulations of the main state of ferromagnetic nanodots with uniaxial anisotropy	770
Shestakov I. Ya., Raeva O. V. The electric field intensity influence on water cleaning from metal ions at the interphase boundary.....	776

PART 4. ECONOMICS

Erygin Yu. V., Belyakov R. A. Determination of market potential and prices of innovative technology	782
Oshchepkova D. S. Human capital as a system of aerospace economic development	787
Podverbnykh O. E., Sandanova B. D. Classification of sources of innovation in the military-industrial complex	792
Information about the authors	801

РАЗДЕЛ
PART
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS,
MECHANICS,
COMPUTER SCIENCE



НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «КРАБИК-БМ»

А. М. Алешечкин*, Д. С. Феоктистов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
*E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru

Несмотря на широкое распространение и удобство применения спутниковых радионавигационных систем (СРНС), радионавигационные системы наземного базирования (РНС) остаются одним из главных средств навигационного обеспечения ряда объектов, например, морских судов. Использование РНС позволяет добиться высокой точности определения координат объектов и исключить ряд недостатков, присущих СРНС. В Сибирском федеральном университете совместно с научно-производственным предприятием «Радиосвязь» с начала 2000-х годов были возобновлены работы по разработке и серийному выпуску наземной РНС УВЧ-диапазона «Крабик-БМ», использующей фазовые методы измерения радионавигационных параметров и предназначенной для геодезической координатной привязки морских надводных объектов. Данная система состоит из нескольких унифицированных приемопередатчиков, которые могут использоваться в качестве бортовых, так и опорных береговых станций путем выбора соответствующего режима работы. В 2003 году начат серийный выпуск данной РНС и ее поставка заказчикам.

В настоящее время использованные при проектировании данной системы технические решения и ее элементная база устарели. Поэтому возникла задача модернизации в первую очередь приемопередатчиков данной РНС с использованием современных комплектующих изделий, средств проектирования и программного обеспечения.

Рассмотрено направление по обновлению аппаратной части данной РНС с применением современных систем на кристалле (СнК), выпускаемых фирмой Xilinx. Наиболее предпочтительным, по мнению авторов, является использование СнК семейства Zynq-7000, сочетающих в одной микросхеме программируемую логику Artix/Kintex-7 и высокопроизводительный ARM-процессор Cortex-A9. Использование предложенной СнК позволяет решить задачи по модернизации приемопередатчиков РНС «Крабик-БМ». В частности, ожидается снижение стоимости и массогабаритных характеристик приемопередатчиков с одновременным повышением их надежности за счет исключения внешних связей между программируемой логикой и процессорной системой. Представлен вид структурной схемы приемопередатчика РНС «Крабик-БМ» до и после модернизации.

Другим направлением совершенствования РНС является разработка программного обеспечения вторичной обработки радионавигационной информации с учетом возможностей и инструментов, предоставляемых современными операционными системами и средами разработки программного обеспечения. Для проектирования подобного рода программного обеспечения целесообразно использовать кроссплатформенные интегрированные среды разработки с открытым исходным кодом и языками высокого уровня. Наиболее подходящим является использование среды Qt Creator, обеспечивающей создание приложений с использованием обширной библиотеки классов и готовых инструментов разработки. Приведены основные элементы интерфейса пользователя программы вторичной обработки результатов радионавигационных измерений, а также ее возможности в части вывода и обработки информации.

В заключение отмечено, что использование выбранных направлений модернизации данной РНС в части аппаратной части и программного обеспечения позволит повысить конкурентоспособность системы «Крабик-БМ» и откроет возможности к ее дальнейшему совершенствованию в силу существенного роста аппаратных и вычислительных ресурсов системы.

Ключевые слова: радионавигационная система, модернизация, система на кристалле, программное обеспечение.

MODERNIZATION DIRECTIONS OF THE HARDWARE AND SOFTWARE OF «KRABIK-BM» RADIO NAVIGATION SYSTEM

A. M. Aleshechkin*, D. S. Feoktistov

Siberian Federal University
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru

Despite the widespread and easy use of satellite navigation systems (SNS), ground-based radio navigation systems (RNS) remain one of the main means of navigating maintenance of a number of objects, such as ships. Using RNS helps to achieve high accuracy in objects positioning, and to eliminate a number of disadvantages of SNS. From the beginning of the 2000s in the Siberian Federal University in collaboration with the Research and Production Enterprise "Radiosvyaz" were resumed the works on the development and serial production of terrestrial RNS UHF-range "Krabik-BM", using the phase measurement techniques and navigation options designed for geodetic gridding sea surface objects. This system consists of several aligned transceivers that can be used as a ship station, and the supporting shore stations by selecting an appropriate operating mode. In 2003 the serial production of the RNS and its delivery to the customer were started.

Nowadays, system solutions and electronic components, used in the design of this, are obsolete. Therefore, there was a task of modernization of transceivers of the RNS mentioned, using modern components, design tools and software.

In the present article the direction to update the hardware of the RNS using modern systems on chip (SoC), manufactured by Xilinx, is considered. Most preferably, according to the authors, is to use the SoC family Zynq-7000, combining into a single chip of programmable logic Artix / Kintex-7 and a high-performance ARM processor Cortex-A9. Using the proposed SoC allows us to solve the task of transceivers RNS "Krabik-BM" upgrade. In particular, it is expected to reduce the cost, weight and dimensions of the transceiver while increasing reliability by eliminating external interactions between the programmable logic and processor system. The article presents the block diagram of the transceiver RNS "Krabik-BM" before and after the upgrade.

Another direction of the development of RNS is the development of radionavigation software of the secondary information processing in terms of opportunities and tools provided by modern operating systems and software development environment. For the design of this kind of software cross-platform integrated development environments with open source and high-level languages should be used. The most suitable one is the use of Qt Creator environment, providing the creation of applications with an extensive class library and ready development tools. The article presents the main elements of the radio navigation results measurements of the secondary processing program user interface, as well as its potential in output and processing terms.

In conclusion, according to the article the use of selected directions of the RNS modernization in terms of hardware and software will enhance the competitiveness of the "Krabik-BM" and open up opportunities for further improvements due to the significant rise of hardware and computing resources of the system.

Keywords: radio navigation system, modernization, system-on-chip, software.

Введение. В настоящее время спутниковые радионавигационные системы (СРНС) обеспечивают высокую точность определения координат и дают возможность выполнения навигационных измерений в любой точке Земли [1; 2]. Вместе с тем СРНС присущи высокая стоимость и сложность развертывания, что прежде всего связано с затратами по развертыванию и восполнению орбитальной группировки навигационных космических аппаратов. Кроме того, при использовании СРНС в стандартном режиме точность определения координат объектов ухудшается в первую очередь за счет влияния ионосферной погрешности, которая устраняется не полностью при использовании одночастотных измерений и моделей ее предсказания. Двухчастотные измерения позволяют повысить точность определения ионосферных поправок к измеренным квазидальностям, однако остаточная погрешность измерения места объектов остается в пределах нескольких метров. При этом использование двухчастотных измерений приводит к удорожанию аппаратуры, повышению ее массы и габаритов, усложнению алгоритмов обработки навигационной измерительной информации. Известно, что повысить точность определения места объектов по сигналам СРНС можно за счет реализации дифференциальных методов измерений, однако это требует развертывания дополнительных контрольно-корректирующих станций, расположенных в точках с известными координатами [1]. К недостаткам СРНС можно также отнести низкую

помехозащищенность вследствие слабого энергетического потенциала радиолинии «спутник–потребитель».

В связи с приведенными выше недостатками, использование только СРНС для решения поставленных задач часто не удовлетворяет требованиям некоторых потребителей, что приводит к тому, что наземные радионавигационные системы (РНС) по-прежнему занимают важное место среди средств навигационного обеспечения ряда объектов, например, морских судов [3]. При этом РНС не подвержены влиянию ионосферы вследствие того, что они работают по поверхностной волне, распространяющейся в приземном слое атмосферы, а в силу меньшего по сравнению с СРНС расстояния между опорными навигационными пунктами и потребителем обеспечивается более высокий энергетический потенциал. Следствием этого является более высокая степень защищенности от помех как естественного, так и искусственного происхождения [4]. При этом сама РНС целиком находится в руках пользователя, в отличие от СРНС, где рядовой пользователь имеет только аппаратуру потребителей и никак не может повлиять на качество работы космического сегмента СРНС.

Наземная РНС «Крабик-БМ». В Красноярске с 1981 года в НПО «Сибцветметавтоматика» проводились работы по созданию РНС «Крабик-БМ». В 1990-е годы данные работы были свернуты в силу известных экономических причин, однако с началом 2000-х годов эти работы были возобновлены уже

на предприятии «Радиосвязь» [5–7]. В результате проведенных работ в настоящее время АО «НПП «Радиосвязь» осуществляет серийный выпуск РНС ближней навигации «Крабик-БМ» [8], которая была разработана совместно с ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». При этом при разработке данной РНС было принято следующее разделение труда: аппаратная часть разрабатывается и выпускается предприятием «Радиосвязь», в то время как разработкой, модернизацией и поддержкой программного обеспечения занимаются сотрудники Сибирского федерального университета.

Разработанная и выпускаемая РНС «Крабик-БМ» является морской фазовой радионавигационной системой УВЧ-диапазона, предназначенной для высокоточной геодезической координатной привязки подвижных и стационарных надводных объектов [8–11]. Также имеются результаты исследований и наработки по использованию данной РНС для определения координат наземных [12; 13] и воздушных [14; 15] объектов.

Причины проведения модернизации РНС «Крабик-БМ». На сегодняшний день в целях повышения конкурентоспособности поставлена задача по модернизации аппаратного и программного обеспечения РНС «Крабик-БМ» [6]. Необходимость осуществления модернизации является следствием ряда причин:

- использование устаревших технологий и элементной базы, которую стало практически невозможно приобретать вследствие прекращения выпуска;
- слабые возможности сопряжения с современными внешними устройствами, используемыми для вывода навигационной информации и повышения точности определения места объектов;
- высокая себестоимость комплектующих изделий;
- необходимость использования возросших возможностей современных операционных систем и вычислительной техники для повышения уровня удобства использования программного обеспечения и расширения его сервисных и функциональных возможностей.

Модернизация элементной базы приемопередатчиков РНС. Осуществление модернизации аппаратной части РНС «Крабик-БМ» имеет несколько возможных направлений, наиболее перспективным среди которых можно считать использование систем на кристалле (СнК), например, Zynq-7000 фирмы Xilinx [16].

Устройства семейства Zynq-7000 сочетают в себе программные возможности высокопроизводительного процессора ARM Cortex-A9 с двумя вычислительными ядрами и программируемой логики Artix/Kintex-7, что обеспечивает высокий уровень производительности, гибкости и масштабируемости. При этом программируемая логика Zynq-7000 позволяет легко изменять архитектуру системы, приспособивая её под решение определенной задачи при помощи специализированных периферийных устройств или модулей расширения. Интеграция на одном кристалле процессорной системы (ПС) и программируемой логики (ПЛ) даёт существенный прирост производи-

тельности за счет ускорения обмена данными между ПС и ПЛ. Весь процесс инициализации платформы Zynq-7000 контролируется процессором. Это означает, что ПС может осуществлять свою работу независимо от ПЛ. Конфигурация ПЛ может быть выполнена как при инициализации системы, так и в другие произвольно выбранные моменты времени.

Структурная схема действующих приемопередатчиков (ППРД) РНС «Крабик-БМ» представлена на рис. 1. Конструктивное исполнение одной станции представляет собой совокупность съемных блоков: блок приемника (ПРМ), блок устройства цифровой обработки (УЦО), блок передатчика (ПРД), а также блок питания, включающий в себя усилитель мощности и антенный коммутатор. Каждый из блоков выполнен на отдельной плате, что в значительной степени сказывается на результирующих массогабаритных показателях ППРД.

Взаимодействие блоков осуществляется через группу физических интерфейсов обмена, которые в настоящее время являются устаревшими и в скором времени могут перестать удовлетворять требованиям по производительности. Кроме того, использование таких связей между блоками снижает надежность ППРД.

Структурная схема ППРД после соответствующей модернизации с использованием платформы Xilinx Zynq-7000 приведена на рис. 2. Конструктивное исполнение ППРД будет представлять собой единый блок, центром которого будет система на кристалле Zynq-7000. Функции вычислителя будут выполняться процессорной частью системы, а вся программная логика блоков ПРМ, УЦО, ПРД будет перенесена и доработана под конкретную логику Zynq-7000.

Следует отметить, что отказ от комбинированного решения из нескольких устаревших ПЛИС и вычислителя и их замена представителем СнК семейства Zynq-7000, содержащим экономичную логику FPGA Artix-7, например серии Z-7020, приведет к существенному снижению себестоимости РНС. Возможностей СнК данной серии с избытком хватит для осуществления всех функций управления и обработки сигналов, возложенных на унифицированные ППРД РНС.

Использование современных операционных систем и их программных возможностей, адаптированных под СнК Zynq-7000, открывает большие возможности по сопряжению и высокоскоростному обмену данными с внешними устройствами. Также стоит отметить и то, что возможности платформы Zynq-7000 определяются не только высокими техническими характеристиками, но и развитой средой разработки, которую компания Xilinx предлагает для аппаратной конфигурации и отладки программного обеспечения своих устройств [17].

Модернизация программного обеспечения бортовой станции. Другим направлением модернизации РНС является замена используемого в бортовой станции (БС) данной системы пульта управления и индикации на мобильный персональный компьютер типа Notebook. При этом ставится задача разработки новой версии программного обеспечения вторичной обработки

информации БС данной РНС. В настоящее время авторами выполняется разработка указанного программного обеспечения, которое будет функционировать под управлением операционной системы Windows XP/7, а в дальнейшем возможен переход к работе под управлением операционных систем семейства Linux.

Общий вид главного окна разрабатываемой программы приведен на рис. 3. В верхней части приведенного окна находится виджет ввода исходных данных. Он имеет ряд вкладок, в которых сгруппированы однотипные данные, что упрощает для пользователя выполнение их ввода.

На вкладке «Общ» вводятся общие параметры программы, такие как система координат всех объектов, признаки широты и долготы объектов, расхождение между местным и гринвичским временем. На вкладке «ОС» пользователю предоставляется возможность ввести координаты береговых опорных станций (ОС) в заданной системе координат, на вкладке «БС» вводятся координаты бортовых станций, вкладка «ППМ» обеспечивает ввод координат поворотных пунктов планируемого маршрута движения БС.

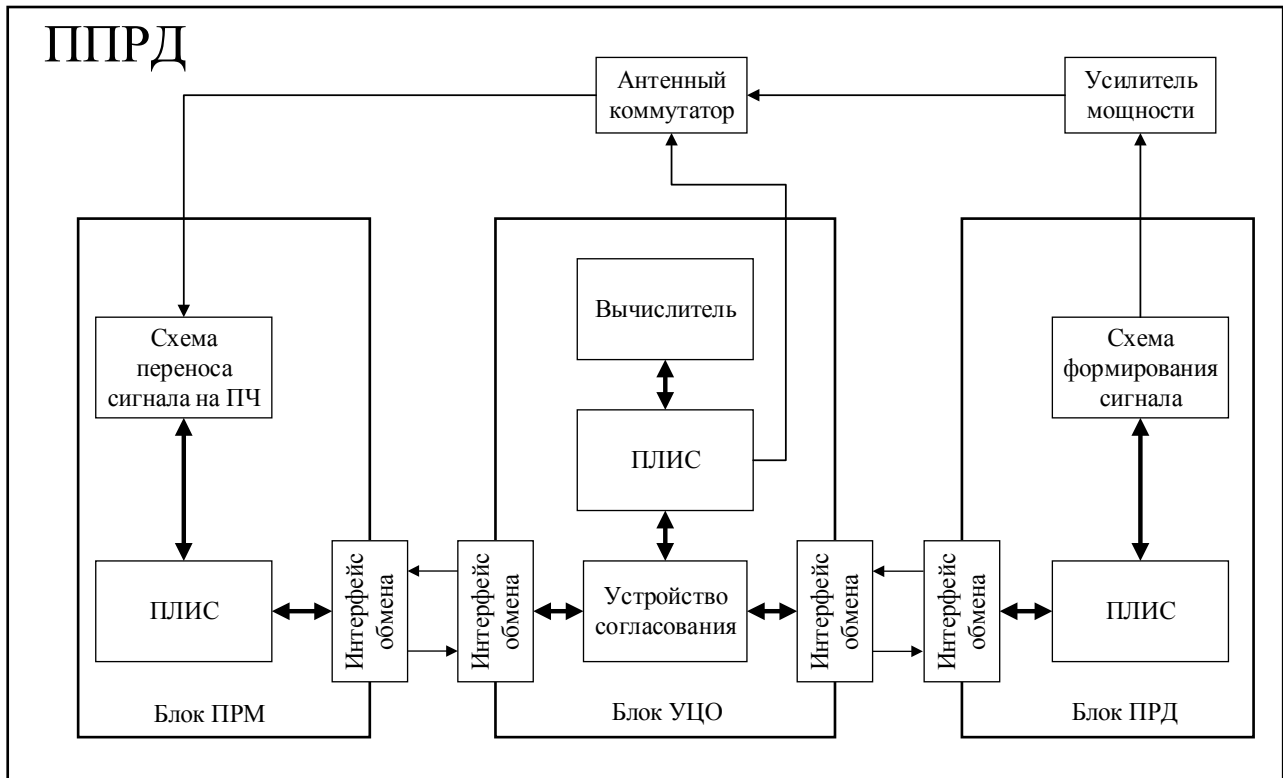


Рис. 1. Структурная схема приемооператчика РНС «Крабик-БМ»

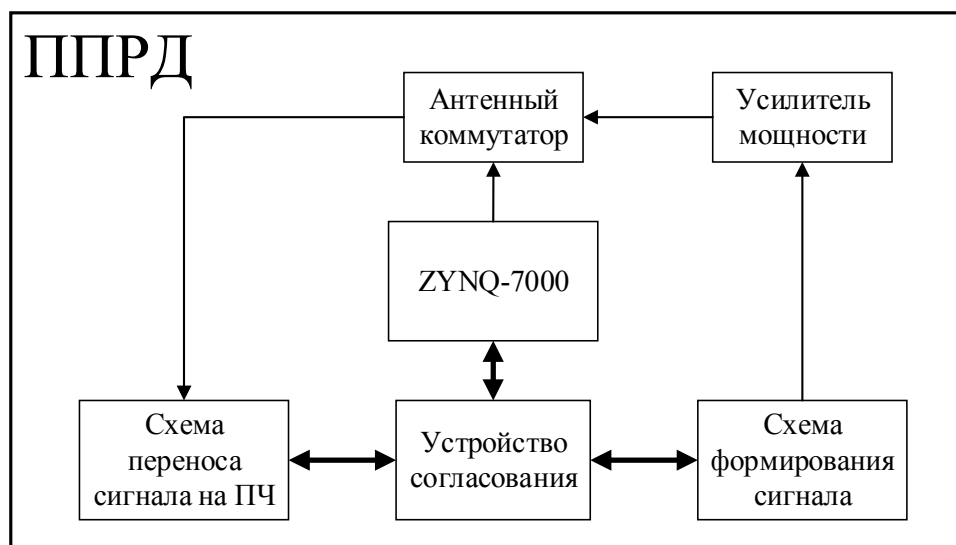


Рис. 2. Структурная схема модернизированного приемооператчика РНС «Крабик-БМ»

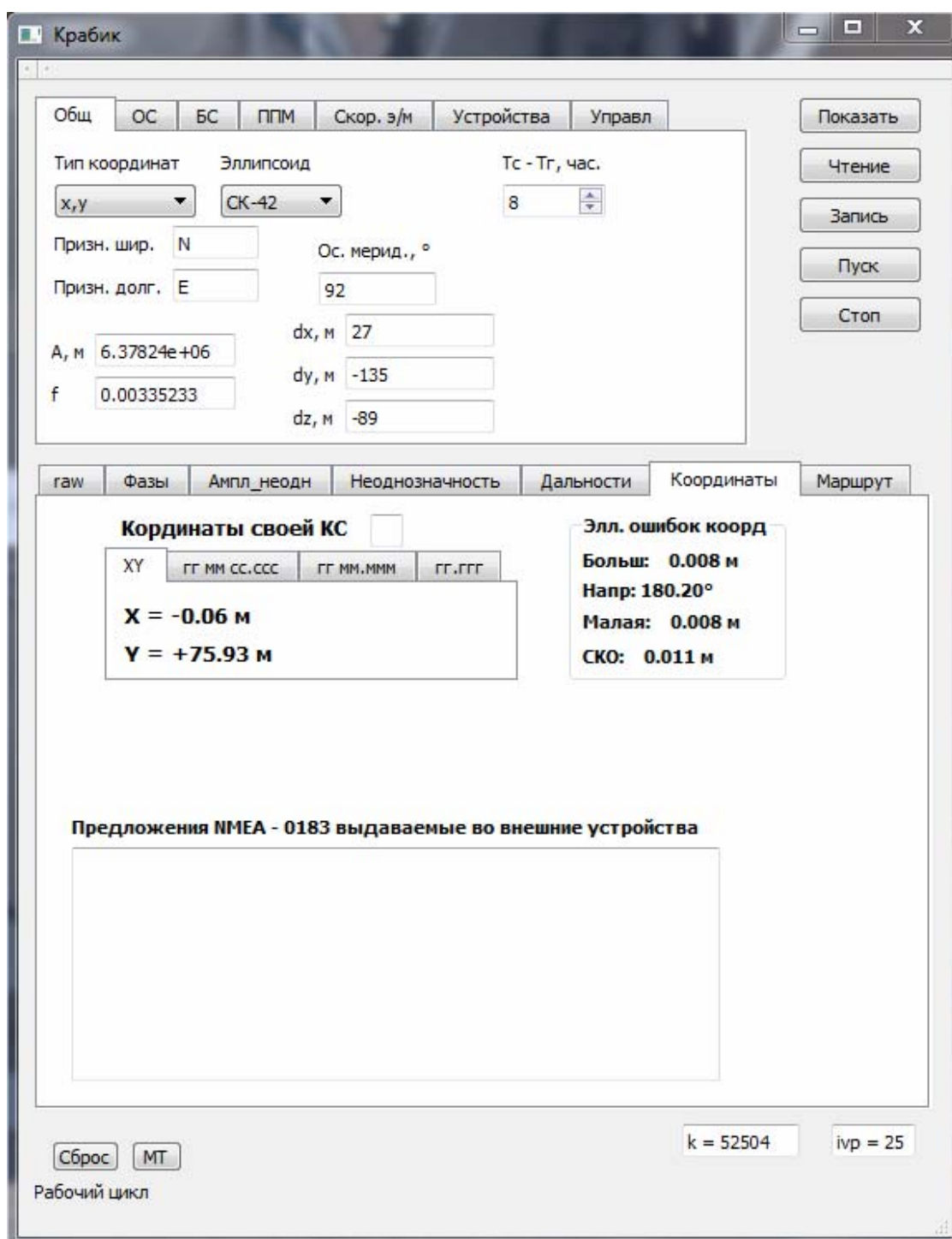


Рис. 3. Главное окно программы вторичной обработки бортовой станции

Вкладка «Скор. э/м» позволяет ввести значения скорости распространения электромагнитных волн. При этом в программе предусмотрено 5 способов учета скорости электромагнитных волн [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

- своя скорость распространения – пользователь вручную вводит значение скорости распространения радиосигналов в атмосфере;
- стандартная – пользователь вводит значение стандартной скорости распространения электромагнитных волн, принятое в соответствии с рекомендациями Международного геодезического и геофизиче-

ского союза, Международного научного радиосоюза, с учетом стандартного значения показателя преломления [19];

- скорость распространения вычисляется по индексу рефракции воздуха, вводимому оператором;
- скорость распространения вычисляется по метеопараметрам (температура, давление, влажность), которые также вводятся оператором вручную; расчет скорости распространения осуществляется в соответствии с выражениями, приведенными в [19];

– автоматический расчет скорости распространения по метеопараметрам, автоматически вводимым с метеостанции, подключаемой к ППРД БС.

Программа обеспечивает автоматический ввод результатов измерений метеостанции, которая может входить в состав бортовой станции РНС «Крабик-БМ». Используя эти данные, определяется индекс рефракции атмосферы и скорость распространения сигналов для текущих погодных условий (температура, давление и влажность воздуха), измеренных в месте нахождения БС [12].

В нижней части приведенного на рис. 3 окна показан виджет выдаваемой в результате расчетов информации. При этом выводится как массив данных, поступающих от ППРД (вкладка «raw»), так и другие промежуточные параметры, требуемые для контроля правильности выполнения всех операций, предусмотренных алгоритмом обработки измеренных значений.

На рис. 3 показан вид вкладки «Координаты», на которой отображаются координаты БС в заданной системе координат. Следует отметить, что программой обеспечивается расчет и отображение значений координат в прямоугольной системе координат Гаусса (вкладка «XY»), а также географических координат, которые выводятся в трех форматах:

- градусы с плавающей точкой (вкладка «гг.ггг»);
- градусы, минуты с плавающей точкой (вкладка «гг мм.ммм»);
- градусы, минуты, секунды с плавающей точкой (вкладка «гг мм сс.ссс»).

Кроме того, вычисляются и выводятся оператору параметры эллипса погрешностей определения координат объектов, в частности, на рис. 3 отображаются такие параметры эллипса погрешностей, как большая и малая полуось, направление большой полуоси, а также среднеквадратическая погрешность определения координат БС. Используя указанные параметры, пользователь может судить о точности измеренных координат.

В нижней части окна выводимой информации о координатах БС отображаются сообщения NMEA-0183, выдаваемые во внешние устройства. Рабочая программа обеспечивает вывод координат и измеренных дальностей во внешние устройства в соответствии с протоколом NMEA-0183 (международный стандарт IEC 61162-1) [20]. Программа обеспечивает выдачу во внешние устройства следующих сообщений: GLL, OSD, VTG, ZDA, RMC [20]. Кроме того, для выдачи значений измеренных радиодальностей используется собственное сообщение DAL, в составе которого во внешние устройства выводятся значения расстояний между БС и соответствующими ОС, а также значения координат БС в прямоугольной системе Гаусса.

Программа обеспечивает расчет скорости движения БС, которая выводится в м/с, км/ч и узлах. Для уменьшения случайных погрешностей измерений фазовых сдвигов используется программная фильтрация полученных значений как на этапе обработки измеренных значений фазовых сдвигов, так и после расче-

та координат. Для сброса фильтров и приведения их в исходное состояние используется кнопка «Сброс» (рис. 3).

В качестве сервисных задач, помогающих при вождении судов, реализован расчет параметров маршрутной навигации, таких как длина всего маршрута и текущего галса, пройденное и оставшееся расстояние на маршруте и на галсе, боковое отклонение от заданной линии галса, маршрутные координаты БС, полученные как проекция на заданную линию пути, путевой угол движения БС. Предусмотрено также непрерывное вычисление расстояния и угла пеленга на заданную пользователем точку, названную в программе специальным пунктом, что позволяет в любой момент времени знать положение БС относительно нее. Имеются возможности запоминания на экране заданной маршрутной точки (МТ) при нажатии кнопки «МТ», что может быть использовано для занесения координат текущей точки в судовую журнал. При этом вместе с координатами запоминается также время фиксации момента прохождения заданной МТ.

Вышеописанная программа в настоящее время разрабатывается в кроссплатформенной среде программирования Qt и обеспечивает работу под управлением операционной системы Windows XP/7. Обеспечение запуска программы под управлением других операционных систем, например Linux или Android, требует только перекомпиляции исходного кода [21]. Это позволит в дальнейшем отказаться от использования операционной системы Windows и перейти к работе в среде операционных систем с открытым исходным кодом.

Заключение. В настоящее время при непосредственном участии авторов статьи проводится разработка и тестирование программного обеспечения программируемой логики и процессорной системы на отладочных платах СнК Zynq-7000, а также разработка программного обеспечения вторичной обработки результатов измерений, выполняемых бортовой станцией.

Выполнение модернизации РНС в соответствии с рассмотренными выше направлениями дает основания ожидать не только повышение надежности и снижение массогабаритных показателей ППРД РНС, но и появление новых возможностей для дальнейшего совершенствования алгоритмов обработки информации, измерение параметров сигналов и расширение функциональных возможностей РНС за счет существенного возрастания используемых вычислительных мощностей и емкости элементной базы.

В частности, могут быть решены следующие задачи:

- метрологическое тестирование и автоматизированная самодиагностика аппаратуры ППРД не только на этапе изготовления и испытаний, но и на этапе эксплуатации изделия;
- использование сложных сигналов для повышения устойчивости к воздействию помех и отраженных сигналов;
- реализация режима цифровой служебной связи между станциями РНС как в процессе функционирования, так и развертывания системы.

Все это позволит и далее успешно использовать РНС «Крабик-БМ» для решения возложенных на нее задач, тем более, что более чем 10-летний опыт серийного выпуска и эксплуатации системы показывает, что она является весьма востребованной как автономная навигационная система для решения задач определения координат объектов на морских акваториях.

Библиографические ссылки

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич [и др.] // под. ред. П. П. Дмитриева, В. С. Шебшаевича. М. : Радио и связь, 1982. 272 с.
2. Алешечкин А. М. Определение угловой ориентации объектов по сигналам спутниковых радионавигационных систем : монография / Сиб. федер. ун-т, Красноярск. 2014. 176 с.
3. Фазовращатели, калибраторы фазы, эталоны фазового сдвига, фазовые измерения в радионавигации : монография / В. М. Сапельников [и др.]. 2-е изд., доп. Уфа : РИЦ УГНТУ, 2014. 275 с.
4. Бондаренко В. Н., Кокорин В. И. Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами. Новосибирск : Наука, 2011. 260 с.
5. Кокорин В. И. Радионавигационные системы и устройства : учеб. пособие. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. 175 с.
6. Направления модернизации радиогодезического комплекса «Крабик-БМ» / П. А. Лопардин [и др.] // Системы связи и радионавигации : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Красноярск : ОАО «НПП «Радиосвязь», 2014. С. 114–115.
7. Алешечкин А. М., Бондаренко В. Н., Кокорин В. И. Основные направления разработки радионавигационной аппаратуры в Красноярском государственном техническом университете // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. № 5. С. 62–73.
8. Высокоточная радионавигационная система для морских потребителей / А. М. Алешечкин [и др.] // Гирскопия и навигация. 2004. № 2. С. 5–12.
9. Алешечкин А. М., Кокорин В. И. Радионавигационная система для определения точных координат акваториальных геологоразведочных и горных выработок // Маркшейдерский вестник. 2003. № 2. С. 54–57.
10. Алешечкин А. М. Вероятность правильного устранения неоднозначности в фазовой радионавигационной системе «Крабик» // Гирскопия и навигация. 2009. № 3. С. 74–82.
11. Алешечкин А. М. Повышение достоверности оценок радионавигационных параметров в радионавигационных системах с фазовыми датчиками // Датчики и системы. 2009. № 7. С. 25–29.
12. Феокистов Д. С., Алешечкин А. М. Использование морской радионавигационной системы «Крабик» для координатного обеспечения наземных объектов // Решетневские чтения : материалы XVII Международ. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракетно-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева :

в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 1. С. 157–159.

13. Исследование методов определения относительных координат группы объектов / А. М. Алешечкин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 3(49). С. 114–118.
14. Гейман В. Н., Алешечкин А. М. Использование дальномерной радионавигационной системы для обеспечения посадки вертолетов [Электронный ресурс] // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. / науч. ред. С. П. Панько ; отв. за вып. А. А. Левицкий ; Сиб. федер. ун-т. Электрон. дан. 32 МБ. Красноярск, 2014. С. 223–227.
15. Алешечкин А. М., Гейман В. Н. Система посадки вертолетов // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки : сб. тезисов докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Авиатор». Воронеж. 2013. С. 87–88.
16. Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. UG585 (Vol. 1.10). 2015. February 23. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf, (дата обращения: 01.04.2015).
17. Zynq-7000 All Programmable SoC SoftWare Developers Guide [Электронный ресурс]. UG821 (Vol. 10.0). 2015. March 10. URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug821-zynq-7000-swdev.pdf, (дата обращения: 01.04.2015).
18. Aleshechkin A. M. Accounting for Signal Travel Speed In Maritime Radiopositioning // Proceedings of 17th Saint Petersburg International Conf. on Integrated Navigation Systems (31 May – 02 June 2010, Saint Petersburg) / State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC. Saint Petersburg, 2010. P. 276–278.
19. Агафонников А. М. Фазовые радиогодезические системы для морских исследований. М. : Наука, 1979. 164 с.
20. Международный стандарт IEC 61162-1:2000. Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital Interfaces. Part 1. Single talker and multiple listeners [Морская навигация и оборудование и системы радиосвязи]. International Electrotechnical Commission, 2000. 129 с.
21. Шлее М. Qt. Профессиональное программирование на C++. СПб. : БХВ-Петербург, 2005. 544 с. : ил.

References

1. Shebshaevich V. S. *Setevye sputnikovye radio-navigatsionnye sistemy* [Network satellite radio navigation system]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 272 p.
2. Aleshechkin A. M. *Opredelenie uglovoy orientatsii ob'ektov po signalam sputnikovykh radionavigatsionnykh system* [Determination of the angular orientation of the objects by the signals of satellite navigation systems]. Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t Publ., 2014, 176 p.
3. Sapel'nikov V. N. *Fazovrashchateli, kalibratory fazy, etalony fazovogo sdviga, fazovye izmereniya v radionavigatsii* [Phase shifters, phase calibrators, standards

of the phase shift, phase measurements in radionavigation]. Ufa, RITs UGNTU Publ., 2014, 275 p.

4. Bondarenko V. N. *Shirokopolosnye radionavigatsionnye sistemy s shumopodobnymi chastotno-manipulirovannymi signalami* [Broadband radio navigation system with noise- frequency manipulate the signals]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011, 260 p.

5. Kokorin V. I. *Radionavigatsionnye sistemy i ustroystva* [Navigation systems and devices]. Krasnoyarsk, KGTU Publ, 2006, 175 p.

6. Lopardin P. A. [Directions of modernization radiogeodetic complex "Krabik-BM"]. *Napravleniya modernizatsii radiogeodezicheskogo kompleksa "Krabik-BM"*. Krasnoyarsk, AO "NPP "Radiosvyaz" Publ., 2014, P. 114–115.

7. Aleshechkin A. M. [The main lines of development of navigational equipment at Krasnoyarsk State Technical University]. *Izvestiya VUZov. Radioelektronika*. 2007, No. 5, p. 62–73 (In Russ.).

8. Aleshechkin A. M. [High-precision navigation system for marine users]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2004, No. 2, P. 5–12 (In Russ.).

9. Aleshechkin A. M. [Navigation system to determine the exact coordinates of the offshore exploration and mining]. *Marksheyderskiy vestnik*. 2003, No. 2, P. 54–57 (In Russ.).

10. Aleshechkin A. M. [The probability of correct disambiguation phase in radio navigation system "Krabik-BM"]. *Giroskopiya i navigatsiya*. 2009, No. 3, P. 74–82 (In Russ.).

11. Aleshechkin A. M. [Increasing the reliability of estimates of the parameters in the navigation radio navigation systems with phase sensors]. *Datchiki i sistemy*. 2009, No. 7, P. 25–29 (In Russ.).

12. Feoktistov D. S. [Use of marine radio navigation system "Krabik" for coordinate provision of ground objects]. *Materialy XVII Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva: v 2 ch.* [Reshetnev Readings: materials XVII Intern. scientific. conf. is devoted of memory general designer of rocket and space systems acad. Reshetnev]. Krasnoyarsk, 2013, Vol. 1, P. 157–159.

13. Aleshechkin A. M. [The study of methods for determining the relative coordinates a group of objects]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3(49), P. 114–118 (In Russ.).

14. Geyman V. N. [Using rangefinder navigation system for helicopter landing]. *Sovremennye problemy radioelektroniki*. 2014, p. 223–227.

15. Aleshechkin A. M. [Helicopter landing system]. *Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki: sb. tezisov dokl. Vseross. nauch.-prakt. konf. "Aviator"* [Recent research questions in avionics theory, maintenance, development]. Voronezh, 2013, P. 87–88 (In Russ.).

16. Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual. UG585. Available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug585-Zynq-7000-TRM.pdf (accessed 02.01.2015).

17. Zynq-7000 All Programmable SoC SoftWare Developers Guide. UG821. Available at: http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug821-zynq-7000-swdev.pdf (accessed 02.01.2015).

18. Aleshechkin A. M. Accounting for Signal Travel Speed In Maritime Radiopositioning. *Proceedings of 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC. Saint Petersburg, 2010, P. 276–278.

19. Agafonnikov A. M. *Fazovye radiogeodezicheskie sistemy dlya morskikh issledovaniy* [Phase radiogeodetic systems for marine research]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 164 p.

20. International Standard IEC 61162-1:2000. *Morskaya navigatsiya, oborudovaniye i sistemy radiosvyazi* [Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems]. International Electrotechnical Commission, 2000, 129 p.

21. Shlee M. *Qt. Professional'noe programmirovaniye na S++* [Qt. Professional programming in C++]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2005, 544 p.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНОГО КСЕНОНОВОГО БАКА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Е. В. Анискович*, В. И. Середин

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного ЦО РАН
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 53

*E-mail: plazal@mail.ru

Представлены результаты определения прочностных характеристик механических свойств материалов металлокомпозитного ксенонового бака высокого давления путем проведения экспериментальных исследований на статическое растяжение образцов, вырезанных из титанового лайнера, и экспериментальных исследований на поперечный четырехточечный изгиб образцов из композитного материала, вырезанных из силовой композитной оболочки бака. На основании проведенных экспериментальных исследований сделаны расчетные обоснования для оценки дополнительных характеристик механических свойств материалов. Для исследования титанового сплава тонкостенной сварной емкости и композитного материала силовой оболочки были вырезаны плоские образцы на растяжение. Образцы вырезались вдоль и поперек проката металла бака. В процессе испытаний на растяжение проводилась автоматическая запись диаграммы деформирования с координатами «нагрузка–перемещение». Для экспериментального исследования композитного материала силовой композитной оболочки бака были вырезаны образцы из двух зон: из верхней части бака вблизи фланца и из области вблизи экватора средней части бака. Образцы из верхней части характеризовались углом намотки лент $-30^\circ \dots +30^\circ$, образцы с экватора – углом $-12^\circ \dots +12^\circ$. В процессе испытаний на поперечный четырехточечный изгиб прикладывалась ступенчатая нагрузка на образец с измерением соответствующего значения перемещения. По результатам испытаний образцов из титанового сплава получены значения предела текучести, предела прочности и относительного сужения материала после разрыва. На основании этих данных расчетным путем получены значения разрушающей деформации и коэффициента деформационного упрочнения металла титанового сплава. По результатам испытаний образцов, вырезанных из композитной оболочки бака, получены диаграммы «нагрузка–перемещение» для образцов двух типов. По этим данным расчетным путем определены значения модулей упругости для образцов из композитного материала двух типов. Полученные значения характеристик механических свойств для титанового сплава и композитного материала по результатам экспериментальных исследований сопоставлены с данными соответствующих нормативных документов. На основании этого уточнены марки титанового сплава и композитного материала, из которых изготовлен металлокомпозитный ксеноновый бак высокого давления.

Ключевые слова: характеристики механических свойств, механические испытания, титановый сплав, композитный материал, разрушающая деформация, металлокомпозитный ксеноновый бак высокого давления.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 554–559**DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS
OF HIGH PRESSURE METAL-XENON TANK**

E. V. Aniskovich*, V. I. Seredin

Special Design and Technological Bureau “Nauka” Krasnoyarsk Scientific Centre of SB RAS
53, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

*E-mail: plazal@mail.ru

Presented are the results of determining the strength characteristics of mechanical properties of the metal-xenon high-pressure tank materials by means of experimental studies on the static tensile specimens cut from the titanium liner and experimental studies on a cross-four-point bending specimens of composite material cut from the power of the composite shell of the tank. Based on the concluded experimental studies, design study to assess the additional characteristics of mechanical properties of materials has been made. To study the thin-walled welded titanium alloy composite material and the container shell power plane and tensile samples were cut parallel and transverse rolled metal tank. During tensile tests automatic recording of strain diagram with the coordinates of load-displacement was conducted. For the experimental studies of composite strength composite shell tank samples were cut from the two zones of the tank

near the top of the flange and the region near the equator of the middle part of the tank. Samples from the top of the angle were characterized by winding tapes $-30^\circ \dots +30^\circ$, samples from the equator $-12^\circ \dots +12^\circ$. During the tests on the transverse four-point bending load speed measurement sample with the corresponding value of displacement was applied. According to the results of tests of samples prepared from a titanium alloy obtained were the yield strength, tensile strength, and percentage reduction of the material after rupture. Based on these data, the calculated values were obtained by breaking strain hardening coefficient and a titanium metal alloy. According to the results of tests of samples cut from the composite shell of the tank load-displacement diagrams for two types of samples were obtained. According to these data, the values were calculated by the modulus of elasticity for samples of composite material of two types. The obtained values of mechanical properties of the titanium alloy and composite based on the results of experimental studies were compared with the data of the relevant regulations. Based on this, refined are the grades of titanium alloy and a composite material, used in the manufacture of the metal-made high-pressure xenon tank.

Keywords: mechanical properties, mechanical and environmental tests, titanium alloy, composite material, breaking strain.

Введение. Для расчетной оценки прочности, живучести и ресурса ксеноновых баков высокого давления (КБВД), являющихся основными элементами ракетносителей ракетно-космической отрасли, необходимы данные по характеристикам свойств материалов, используемых при их изготовлении. Для обоснования методов экспериментальных исследований в первую очередь были подробно проанализированы конструктивные и технологические особенности баков.

Объект исследования. Конструкция металлокомпозитного ксенонового бака высокого давления представляет собой армированную оболочку вращения, получаемую в процессе непрерывной намотки композитной ленты на тонкостенный металлический сосуд (лейнер) (рис. 1). Металлический лейнер обеспечивает герметичность бака, а композитная оболочка обеспечивает его прочность. Баки работают под воздействием внутреннего избыточного давлением газовой среды.

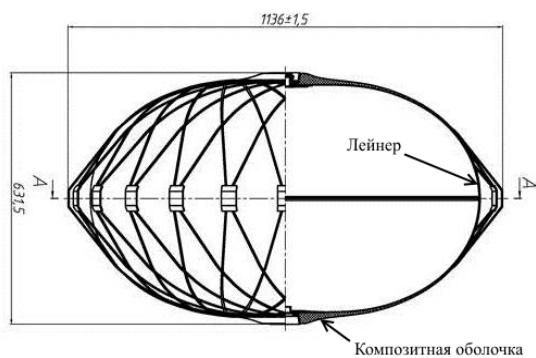


Рис. 1. Конструктивная схема и основные размеры металлокомпозитного бака высокого давления

Лейнер представляет собой тонкостенную сварную емкость из титанового сплава, состоящую из двух днищ переменной толщины, фланцев и кольца подкладного. Заготовка днищ изготавливается методом раскатки из листа ВТ1-0 1,5 по ГОСТ 22178–76. Фланцы изготавливаются сборно-сварными, биметаллическими, из титана ВТ1-0 и стали 12Х18Н10Т. Днища между собой (по подкладному кольцу) и с фланцами соединяются электронно-лучевой сваркой по ОСТ 92-1151–81.

Композитная силовая оболочка изготавливается спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лейнер пакетов угольных волокон в несколько слоев. Материал волокон – IMS60 или T1000. Связующим является эпоксидная смола.

Таким образом, КБВД представляет собой техническую систему, состоящую из двух основных частей: титановой сварной оболочки и силовой композитной оболочки, а также вспомогательных элементов конструкции (фланец и т. д.).

Методика экспериментальных и расчетных исследований титановых образцов. Экспериментальные исследования заключались в испытании образцов из титанового сплава на растяжение и на 4-точечный изгиб.

Испытания образцов из титанового сплава на растяжение проводились по ГОСТ 1497–84 [1]. Использовались плоские пропорциональные образцы с головкой типа I двух типов: вертикальные образцы, вырезанные из титановой оболочки вдоль проката, и горизонтальные образцы, вырезанные из оболочки поперек проката (рис. 2).

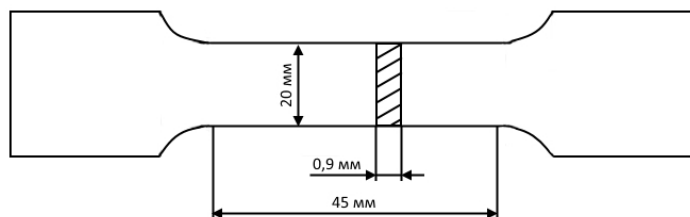


Рис. 2. Пропорциональный образец с головкой типа I по ГОСТ 1497–84 для испытаний на статическое растяжение

В процессе нагружения проводилась автоматическая запись диаграммы деформирования «нагрузка–перемещение» с визуализацией на экран ПК. Затем производилась обработка результатов испытаний и расчет значений характеристик механических свойств [1].

Разрушающая деформация ε_f титанового лейнера после проведения испытания образцов на растяжение рассчитывалась по формуле [2]

$$\varepsilon_f = \ln \frac{1}{1-\psi} 100 \%, \quad (1)$$

где ψ – значение относительного сужения материала после разрыва, полученное в результате проведенных испытаний на растяжение.

Коэффициент деформационного упрочнения металла m определялся по формуле [2]

$$m = 0,75 \frac{\lg \left(\frac{S_k}{\sigma_{0,2}} \right)}{\lg \left(\frac{1}{\sigma_{0,2}/E + 0,2 \cdot 10^{-2} \ln \frac{1}{1-\psi_k}} \right)}, \quad (2)$$

где $E = 1 \cdot 10^5$ ЕД – модуль упругости титанового сплава; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, полученный в результате испытания образцов на растяжение; $\psi_k = \psi$; S_k – сопротивление разрыву, определяемое по формуле

$$\frac{S_k}{\sigma_{0,2}} = 1 + 1,4\psi_k. \quad (3)$$

Методика экспериментальных и расчетных исследований композитных образцов. Испытания образцов, вырезанных из композитной оболочки, на 4-точечный изгиб проводились в соответствии с ГОСТ 25.604–82 [3–16]. Образцы испытывались на испытательном стенде, представляющем собой две цилиндрические опоры и две оправки $\varnothing 10$ мм, посредством которых сверху прикладывалась ступенчатая нагрузка по схеме 4-точечного изгиба (рис. 3). Перемещения измерялись с нижней стороны образца, посередине пролета, с помощью электронного преобразователя линейных перемещений марки ЛИР-7М-1. Испытания проводились при нормальной температуре – 20 °С.

Испытания проводились на образцах двух типов, вырезанных из двух разных мест композитной оболочки бака. Первый тип образцов вырезался из верхней части композитной оболочки вблизи фланца и характеризовался толщиной стенки в диапазоне 9,8–12,1 мм и углом укладки композитной ленты 30°. Второй тип образцов вырезался из средней части композитной оболочки вблизи экватора бака и характеризовался толщиной стенки в диапазоне 3,1–3,3 мм и углом укладки композитной ленты 12,5°. Размер образцов в соответствии с ГОСТ 25.604–82 [9] составлял 110×5 мм при разной толщине стенки. Образцы размечались на композитной оболочке таким образом, чтобы ленты намотки композита располага-

лись симметрично относительно друг друга по длине образца.

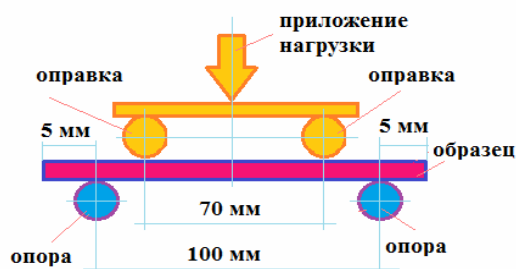


Рис. 3. Схема испытания композитного образца на 4-точечный изгиб

Методика испытания заключалась в приложении ступенчатой нагрузки на образец и измерении соответствующего ей значения перемещения. По полученным данным, в соответствии с ГОСТ 25.604–82, определялся модуль упругости при поперечном 4-точечном изгибе для каждого типа композитного образца по формуле

$$\dot{L}_D^{\xi} = \frac{\Delta F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta w}, \quad (4)$$

где ΔF – приращение нагрузки; l – расстояние между опорами; b и h – ширина и высота образца; Δw – приращение прогиба в середине образца, соответствующее изменению нагрузки на ΔF .

Результаты экспериментальных и расчетных исследований титановых образцов. Результаты испытаний образцов из титанового сплава представлены в табл. 1. Указанные значения характеристик механических свойств в целом соответствуют данным для титанового сплава ВТ1-0 [10]. Значения механических свойств вертикальных образцов, вырезанных из титановой оболочки вдоль проката, полностью соответствуют значениям, указанным в ГОСТ, а значения механических свойств горизонтальных образцов, вырезанных поперек проката, немного ниже.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований композитных образцов.

По результатам испытаний композитных образцов 1 и 2 типа на 4-точечный изгиб получены диаграммы «нагрузка–перемещение» (рис. 4, 5). Значения модуля упругости композитной оболочки бака для образцов первого и второго типа представлены в табл. 2.

Заключение. Проведены испытания и определены прочностные механические свойства материалов, из которых изготавливаются металлокомпозитные ксеноновые баки высокого давления.

По результатам испытаний на растяжение определено, что предел текучести, предел прочности и относительное сужение титанового сплава в целом соответствуют данным для титанового сплава ВТ1-0 по ГОСТ 22178–76. Разрушающая деформация титанового сплава по расчету равна 1,27 для горизонтальных образцов и 1,08 – для вертикальных образцов, а коэффициент деформационного упрочнения составляет 0,095 для горизонтальных образцов и 0,092 – для вертикальных.

Таблица 1

**Значения характеристик механических свойств
титанового сплава лайнера металлокомпозитного бака**

№ п/п	Показатель	Средние значения		Значения по ГОСТ 22178–76 [5]
		Горизонтальные образцы	Вертикальные образцы	
1	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	335	348	В диапазоне 200–400
2	Временное сопротивление разрушению σ_b , МПа	506	553	Не менее 345
3	Относительное сужение ψ , %	72	66	Не менее 40
4	Разрушающая деформация ε_f	1,27	1,08	–
5	Коэффициент деформационного упрочнения m	0,095	0,092	–

Таблица 2

Значения модуля упругости образцов из композитной оболочки бака

№ п/п	Тип образца	Место вырезки	Угол намотки композита	Диапазон значений модуля упругости E , МПа	Среднее значение модуля упругости E , МПа
1	Тип 1, горизонтальное расположение	Вблизи экватора композитной оболочки бака	12,5°	$4,69 \cdot 10^3$ – $4,83 \cdot 10^3$	$4,75 \cdot 10^3$
2	Тип 2, горизонтальное расположение	В верхней части композитной оболочки, около фланца	30°	$9,31 \cdot 10^4$ – $9,66 \cdot 10^4$	$9,47 \cdot 10^4$

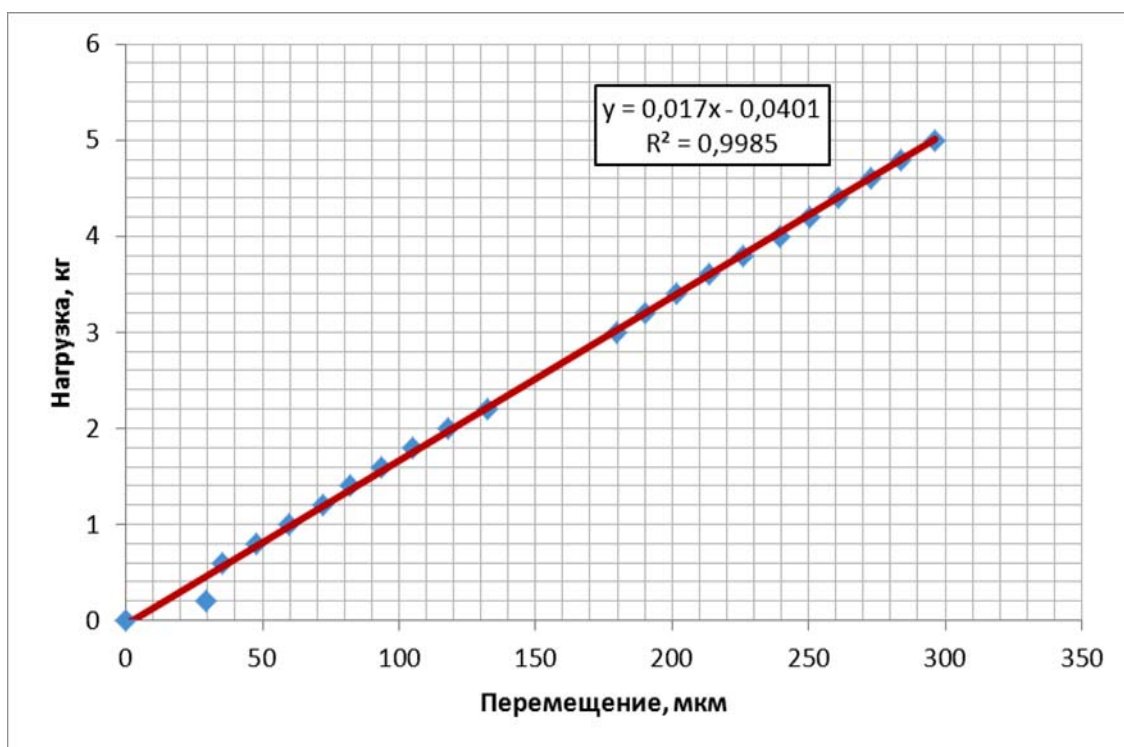


Рис. 4. Диаграмма «нагрузка–перемещение» образца из композита, тип 1

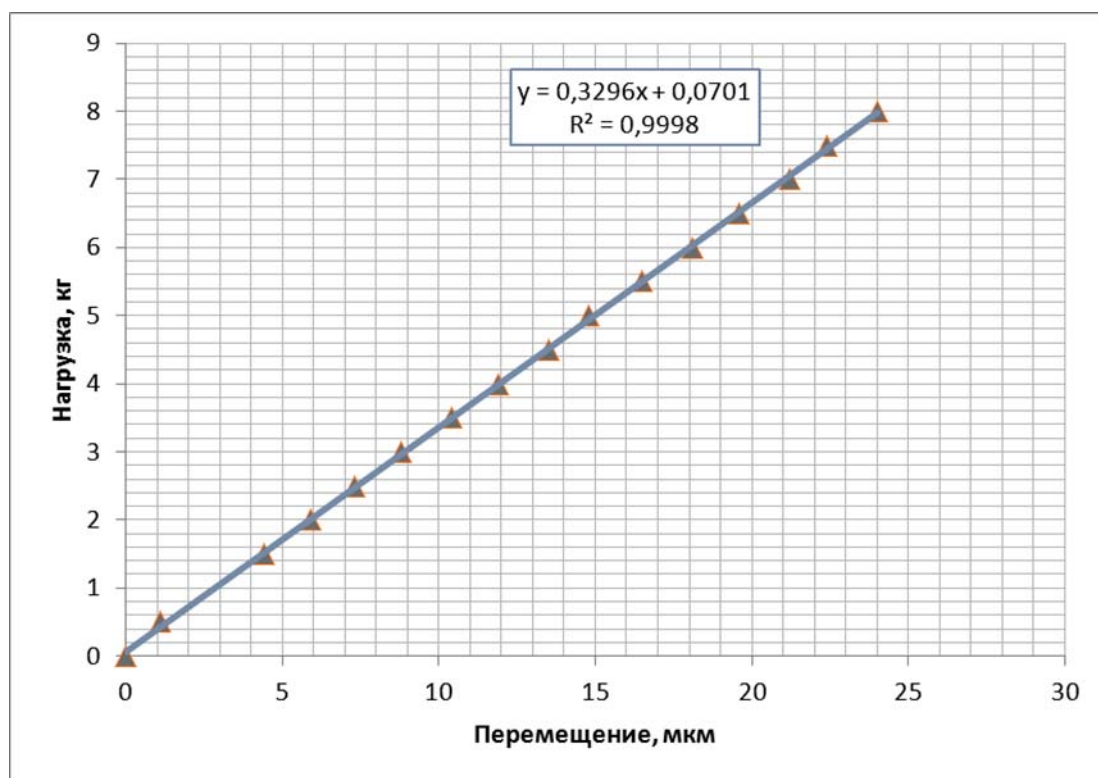


Рис. 5. Диаграмма «нагрузка–перемещение» образца из композита, тип 2

По результатам испытаний на 4-точечный изгиб образцов из композита получены диаграммы «нагрузка–перемещение» и определено два значения модуля упругости композита при угле намотки композитной ленты 30° и $12,5^\circ$ соответственно: $E_1 = 4,75 \cdot 10^3$ МПа; $E_2 = 9,47 \cdot 10^4$ МПа. Полученные результаты модулей упругости в общем соответствуют данным исследований для материала IMS60.

Благодарности. Статья подготовлена с использованием результатов, полученных при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России, в ходе реализации проекта по соглашению № 14.607.21.0038 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», RFMEFI60714X0038.

Acknowledgments. This article was prepared with the use of the result(s) produced with the financial support of the state represented by Ministry of Education of Russia, during the implementation of the project under the Agreement № 14.607.21.0038 under the FTP “Research and development on priority directions of scientific technological complex of Russia for 2014–2020”, RFMEFI60714X0038.

Библиографические ссылки

- ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 1986–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1984. 28 с.
- Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
- Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композитных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 145 с.
- Комков М. А., Тарасов В. А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 431 с.
- Справочник по композиционным материалам. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта, под ред. Б. Э. Геллера. М. : Машиностроение, 1988. 448 с.
- Соппротивление материалов : учебник для вузов / под общ. ред. акад. АН УССР Г. С. Писаренко. 4-е изд., перераб. и доп. Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1979. 696 с.
- Фудзии Т., Зако М. Механика разрушения композиционных материалов : пер. с яп. М. : Мир, 1982. 232 с.
- Углеродные волокна и углекомпозиты : пер. с англ. / Э. Фитцер [и др.]. М. : Мир, 1988. 336 с.
- Чамис К. К. Проектирование элементов конструкций из композитов // Композиционные материалы : пер. с англ. / под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М. : Машиностроение, 1978. Т. 8, ч. 2. С. 214–252.
- Миёси Т., Сиратори М. Анализ деформаций и поведения конструкций при разрушении методом конечных элементов : пер. с яп. М. : Мир, 1976. 206 с.
- Джоне Б. Х. Вероятностные методы и надежность конструкций // Композиционные материалы : пер. с англ. / под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М. : Машиностроение, 1978. Т. 8, ч. 2. С. 42–80.
- Halpin J. C., Kopf J. R., Goldberg W. J. Composite Materials. 1970. 462 p.

13. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М. : Техносфера, 2004. 408 с.

14. Браутман Л., Крок Р., Нотон Б. Композиционные материалы. Т. 3. Применение композиционных материалов в технике. М. : Машиностроение, 1978. 511 с.

15. ГОСТ 22178–76. Листы из титана и титановых сплавов. Введ. 1978–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1976. 18 с.

16. ГОСТ 25.604–82. Методы механических испытаний композитных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Введ. 1984–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1983. 15 с.

References

1. GOST 1497–84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie*. [State Standart 1497-84. Metals. Methods of tensile tests]. Moscow, IPK Standartinform Publ., 1984, 28 p.

2. Mahutov N. A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost'*. [Deformation and fracture criteria for the calculation of structural elements for strength]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 272 p.

3. Obrazcov I. F., Vasilyev V. V. Bunakov V. A. *Optimal'noe armirovanie obolochek vrashcheniya iz kompozitnykh materialov*. [Optimal reinforcement shells of revolution from composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 145 p.

4. Komkov M. A. Tarasov V. A. *Tekhnologiya namotki kompozitsionnykh konstruktsiy raket i sredstv porazheniya*. [Technology winding composite structures missiles and weapons of destruction]. Moscow, MGTU Publ., 2011, 431 p.

5. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam. Kn. 1. Pod red. D. Lyubina* [Handbook of composite materials. Bk. 1. Ed. J. Lubin]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 448 p.

6. *Soprotivlenie materialov*. [Strength of materials]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1979, 696 p.

7. Fudzii T., Zako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov: per. s yaponskogo*. [Fracture mechanics of composite materials]. Moscow, Mir Publ., 1982, 232 p.

8. Pfitzer E., Difendorf R., Kalnin I. et al. *Uglerodnye volokna i uglekompozity* [Carbon fibers and carbon-based composite]. Moscow, Mir Publ., 1988, 336 p.

9. Chamis K. K. *Proektirovanie elementov konstruktsiy iz kompozitnov. V kn.: Kompozitsionnyy materialy* [Design of composite structural elements. In the book: Composite materials]. Ed. L. Brautmana and R. Kroka. T. 8, Ch. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 214–252 p.

10. Mijosi T., Siratori M. *Analiz deformatsiy i povedeniya konstruktsiy pri razrushenii metodom konechnykh elementov*. [Analysis of deformation and fracture behavior of structures using finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1976, 206 p.

11. Dzhone B. H. *Veroyatnostnye metody i nadezhnost' konstruktsiy. V kn.: Kompozitsionnyy materialy*. [Probabilistic methods and reliability of structures. In the book: Composite materials. Ed. L. Brautmana and R. Kroka. T. 8, Ch. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 42–80 p.

12. Halpin J. C., Kopf J. R., Goldberg W. J. *Composite Materials*, 1970, 462 p.

13. Mett'yuz F., Rolings R. *Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya*. [Composite materials. Mechanics and technology]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2004, 408 p.

14. Brautman L., Krok R., Noton B. *Kompozitsionnyy materialy. T. 3: Primenenie kompozitsionnykh materialov v tekhnike*. [Composite materials. Vol. 3: Application of composite materials in technics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 511 p.

15. GOST 22178–76. *Listy iz titana i titanovykh spлавov*. [State Standart 22178–76. Sheets made of titanium and titanium alloys]. Moscow, Standartinform Publ., 1976, 18 p.

16. GOST 25.604–82. *Metody mekhanicheskikh ispytaniy kompozitnykh materialov s polimernoy matritsey (kompozitov). Metod ispytaniya na izgib pri normal'noy, povyshennoy i ponizhennoy temperaturakh*. [State Standart 25.604–82. Methods of mechanical testing of composite materials with the polymeric matrix (composites). Test method for bending with normal, high and low temperatures]. Moscow, IPK Standartinform Publ., 1983, 15 p.

**ОБ УПРАВЛЕНИИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫМИ
ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

А. В. Банникова*, А. А. Корнеева

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
*E-mail: bannikova.anast@gmail.com

Рассматривается задача управления стохастическими объектами с дискретно-непрерывным характером технологического процесса в условиях непараметрической неопределенности, в частности, исследуется задача управления безынерционными объектами с запаздыванием. Подобные процессы часто имеют место в различных контурах управления аэрокосмическими объектами и системами. Например, при изготовлении электрорадиоизделий (ЭРИ), которых в космическом аппарате порядка 150 тыс., ЭРИ могут быть представлены как последовательность локальных объектов, как динамического характера, так и безынерционных с запаздыванием. Рассматривается ситуация, когда на вход объекта поступает несколько управляемых входных переменных. Это накладывает свой отпечаток при управлении подобными процессами и обуславливает актуальность рассматриваемой задачи. Приводятся теоретические сведения о непараметрических алгоритмах управления в условиях неполной информации об управляемом процессе. Основное внимание уделяется построению непараметрических алгоритмов дуального управления. Существенное отличие алгоритмов дуального управления от общепринятых состоит в том, что управляющее устройство выполняет две функции: изучение и управление в процессе активного накопления информации. Алгоритм вычисления последовательности управляющих входных воздействий (цепочки) строится по следующей схеме: первое управляющее воздействие выбирается произвольным на основе практических соображений, а следующие вычисляются с помощью непараметрических алгоритмов дуального управления уже с учетом первого. Далее эта схема повторяется, т. е. каждые последующие значения компоненты вектора управляющих воздействий рассчитываются с учетом всех предыдущих. При этом вид уравнения, описывающий локальный процесс, остается неизвестным из-за недостатка априорной информации. Подробно приводятся результаты численного исследования применения алгоритмов непараметрического адаптивного дуального управления при нескольких управляемых воздействиях. При моделировании характеристики объектов описывались нелинейными звеньями, вид которых был неизвестен и которые в процессе активного накопления информации автоматически восстанавливались на основании измерения входных-выходных переменных процесса. Исследование проводилось при различных задающих воздействиях, которые могли иметь ступенчатый характер или соответствовали тем или иным траекториям. Также исследовалось влияние различных помех, действующих на объект и в каналах измерения. Результаты численного исследования показали достаточно высокую эффективность непараметрических алгоритмов дуального управления многомерными безынерционными объектами в условиях неполной информации.

Ключевые слова: априорная информация, непараметрическое управление, стохастический процесс, дуальное управление, безынерционный объект.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 560–565**ABOUT CONTROL OF INERTIA LESS DISCRETE-CONTINUOUS
PROCESSES WITH RETARDATION**

A. V. Bannikova*, A. A. Korneeva

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
*E-mail: bannikova.anast@gmail.com

Presented is the problem of stochastic control objects with discrete-continuous nature of the process in non-parametric uncertainties, in particular, the problem of the process management without memory delay has been studied. Similar processes occur in many different control loops of aerospace objects and systems. For example, in the manufacture of electro-radio products, in the spacecraft about reaching 150 thousand, can be represented both as a series of local objects dynamic nature and freewheeling delay. This article describes a situation where the input object

receives several controlled input variables. It leaves its mark in the management of such processes, and determines the relevance of the problem. The article provides theoretical information on nonparametric control algorithms under incomplete information about the controlled process. The focus is on the construction of nonparametric algorithms of dual control. The essential difference between dual control algorithms from the standard is that the control unit performs two functions: research and management in the process of active accumulation of information. Algorithm for computing the sequence of control input actions (chain) is based on following Manufacture scheme: first control actions are chosen at random, based on practical considerations, but the following one is calculated using the nonparametric algorithms of dual control taking into account the first. Further, this pattern is repeated, i. e. each subsequent value of the components of the control actions is calculated taking into account all the previous ones. Thus, the form of the equation describing the local process remains unknown due to the lack of a priori information. Detailed results of the numerical investigation of the use of nonparametric algorithms for adaptive dual control at several control actions are given. In the simulation, the characteristics of the objects were described by non-linear components, the form of which was unknown, and which, in the active acquisition of information automatically restored on the basis of measurement of the input-output variables of the process. The study was conducted at different reference variables that could have stepped character, or comply with one or another path. Also the effect of different noise acting on the object and the measurement channels were investigated. The results of numerical studies have shown high enough efficiency of nonparametric algorithms of dual control multidimensional process without memory under conditions of incomplete information.

Keywords: a priori information, nonparametric control, stochastic process, dual control, the instantaneous object.

Введение. В настоящее время наиболее развитой теорией, в рамках задач идентификации и управления, является теория параметрических систем. Данная теория предполагает, что на этапе формулировки задачи идентификации и управления каким-то образом выбирается параметрическая структура модели, описывающая процесс, или некоторое уравнение, известное с точностью до параметров. Данный подход получил значительное развитие в рамках теории адаптивных управляющих систем [1–3]. Но часто априорной информации бывает недостаточно для обоснованного выбора параметрического класса моделей, так как исследователю часто приходится сталкиваться с малоизученными процессами и объектами, структура моделей для которых неизвестна. В случае, когда априорной информации недостаточно, чтобы выбрать параметрическую структуру модели исследуемого процесса, естественно использовать теорию непараметрической системы управления [4; 5]. Непараметрическая теория, в отличие от предыдущей, предполагает, что известны только качественные характеристики системы [6]. Основное внимание в дальнейшем будет уделено задачам управления в условиях непараметрической неопределенности, а также случаю, когда на вход исследуемого процесса будут поступать несколько управляемых входных воздействий. Подобные ситуации возникают при изготовлении ракетных двигателей, диагностике электрорадиоизделий [7] и решении других задач в области аэрокосмической промышленности.

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена тем, что, как правило, реальные технологические процессы являются многомерными, а управляющее воздействие представляет собой вектор, состоящий из нескольких входных переменных. При этом расчет входных управляющих воздействий в данном случае представляет собой специальный самостоятельный интерес. В настоящей статье сделан акцент на исследовании непараметрического алгоритма дуального управления безынерционными процессами с запаздыванием.

Постановка задачи управления. Пусть объект представляет собой безынерционную систему и опи-

сывается уравнением $x(t) = f(u_1(t), \dots, u_m(t))$, где $f(\cdot)$ – неизвестный функционал; $x(t)$ – выходная переменная процесса; $u_1(t), \dots, u_m(t)$ – управляющие воздействия. Если на вход объекта управления поступает несколько управляющих воздействий, то тут можно говорить уже о цепочке алгоритмов управления. Рассмотрим схему, представленную на рис. 1, где приняты следующие обозначения: $x^*(t)$ – задающее воздействие, (t) – непрерывное время, $\xi(t)$ – векторная случайная помеха.

Контроль переменных осуществляется через интервал времени Δt . Таким образом, можно получить исходную выборку входных-выходных переменных $\{x_i, u_{1i}, \dots, u_{mi}, i = \overline{1, s}\}$, где s – объем выборки.

Большинство окружающих нас процессов можно отнести к классу дискретно-непрерывных [8], т. е. сам процесс протекает во времени непрерывно, а контроль его переменных осуществляется в дискретные моменты времени. Следует заметить, что важность задачи управления безынерционными объектами обусловлена, прежде всего, средствами контроля выходных переменных объекта $x(t)$, так как следует учитывать, что контроль доступен не электрическими средствами, а соответствующей методикой лабораторного контроля, и зачастую оказывается, что время, затраченное на измерение переменных, может значительно превышать постоянную времени объекта. По этой причине мы вынуждены рассматривать динамический по своей природе процесс как безынерционный объект с запаздыванием.

Непараметрическое дуальное управление. Дуальное управление было открыто А. А. Фельдбаумом и развито на основе теории статистических решений [9]. Следует отметить, что обучающиеся системы управления являются системами «с памятью», т. е. они не только способны изучать характеристики объекта, но и, сохраняя их в памяти, вырабатывать рациональные управляющие воздействия. Теория непараметрических систем управления достаточно подробно изложена в [10; 11].

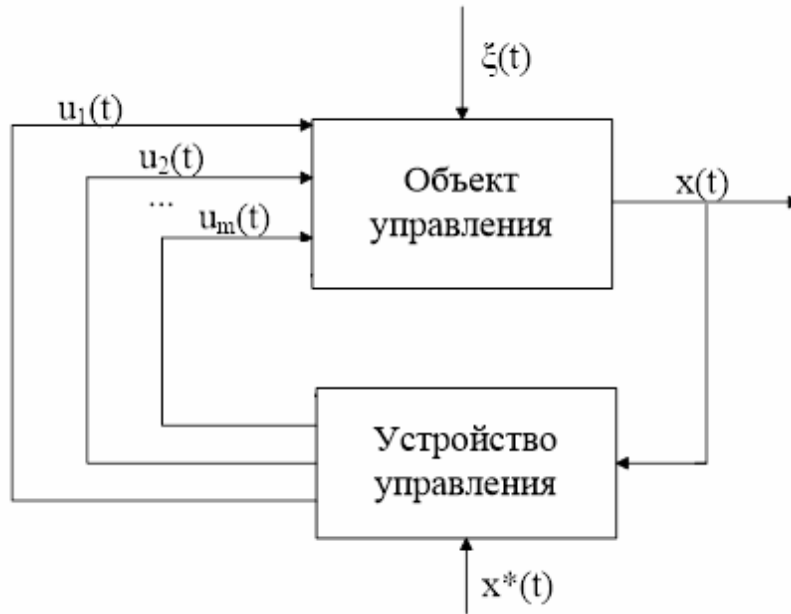


Рис. 1. Блок-схема управления

Непараметрический алгоритм дуального управления, подробно описанный в [12; 13], имеет вид

$$u_{i,s+1} = u_{i,s}^* + \Delta u_{i,s+1}, \quad (1)$$

где в $u_{i,s}^*$ сосредоточены «знания» об объекте, а $\Delta u_{i,s+1}$ – «изучающие» поисковые шаги:

$$\Delta u_{i,s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s). \quad (2)$$

В этом и состоит дуализм алгоритма (1).

В данном случае на вход объекта управления поступает векторное управляющее воздействие $u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$. В этом случае управление u_1 , в принципе, может быть задано произвольным из $\Omega(u_1)$. При выборе u_1 можно руководствоваться практическими соображениями, например, экономическими или экологическими. Тогда формула для расчета $u_{2,s}^*$ принимает вид

$$u_{2,s}^* = \frac{\sum_{i=1}^s u_2^i \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{j,s+1}^* - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u_1 - u_1^i}{c_s^{u_1}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{j,s+1}^* - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)}, \quad (3)$$

где $\hat{O}(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция [14]; c_s – коэффициенты размытости ядра, которые удовлетворяют условиям сходимости [15].

Таким образом, значение управляющего воздействия u_2 на данной итерации рассчитывается с учетом значения переменной u_1 . Для расчета значения u_3 будут приниматься во внимание значения u_1 и u_2 . В итоге для расчета значения переменной u_m может быть использована формула:

$$u_{m,s}^* = \frac{\sum_{i=1}^s u_m^i \prod_{l=1}^{m-1} \Phi\left(\frac{u_l - u_l^i}{c_s^{u_l}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{j,s+1}^* - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{l=1}^{m-1} \Phi\left(\frac{u_l - u_l^i}{c_s^{u_l}}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_{j,s+1}^* - x_j^i}{c_s^{x_j}}\right)}. \quad (4)$$

Расчет коэффициента размытости ядра c_s^u по каждой компоненте производится в соответствии со следующей формулой:

$$c_s^u = \rho |u_{s+1} - u^0|, \quad (5)$$

где коэффициент $\rho > 1$; u^0 – точка из выборки $\{u_i\}$, $i = \overline{1, s}$, по своему значению наиболее близкая к значению точки u_{s+1} .

Таким образом, значение каждой компоненты вектора управляющего воздействия $u = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$ выбирается последовательно, с учетом уже определенных значений предыдущих компонент, что позволяет осуществлять более качественное управление процессом.

Проанализируем характер дуализма алгоритма (1). На начальной стадии управления основная роль принадлежит второму слагаемому Δu_{s+1} из формулы (1). Это случай активного накопления информации в системе дуального управления, который начинается с появления первого наблюдения входной и выходной переменных объекта. По мере процесса обучения (накопления информации) всё возрастающую роль при формировании управляющего воздействия u_{s+1} начинает играть первое слагаемое, т. е. u_s^* . Таким образом, в процессе дуального управления объектом фигурируют как этап изучения объекта, так и этап приведения его к цели.

Численное исследование. Проверим работоспособность алгоритмов управления в рамках вычислительного эксперимента. Пусть исследуемый объект описывается уравнением вида

$$\dot{x}(t) = 0,4 \cdot \sin(u_1(t)) + u_2^2(t) + 0,5u_3(t), \quad (6)$$

где $x(t)$ – выходная переменная процесса; $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ – входные управляемые переменные процесса.

Пусть задание имеет вид траектории $x^*(t) = 2,5 + \cos(0,05 \cdot t)$. Результат работы непараметрических алгоритмов дуального управления представлен на рис. 2, где приняты следующие обозначения: $x(t)$ – выход объекта при управлении непараметрическим регулятором; $x^*(t)$ – задание. Ошибка регулирования равна 0,09.

Проанализируем качество управления при изменении задающего воздействия. Увеличим частоту колебаний задания, пусть $x^*(t)$ -задание имеет вид траектории $x^*(t) = 2 + \sin(0,2 \cdot t)$ (рис. 3).

Ошибка регулирования для случая, изображенного на рис. 3, равна 0,12. Из рис. 3 и значений относительной ошибки регулирования можно сделать вывод, что при более изменчивом характере уравнения

задающего воздействия качество управления уменьшается.

Пусть задание имеет вид ступенчатого воздействия (рис. 4).

Рассмотрим работу непараметрического дуального алгоритма управления подробнее. Обучение управлению начинается с первых наблюдений x_1 , u_1 , u_2 , u_3 . На начальной стадии управления необходимо некоторое время (накопление выборки) для приведения объекта в заданное состояние, но уже на следующих этапах работы алгоритм почти мгновенно достигает задания.

Рассмотрим зависимость качества регулирования с помощью непараметрических методов дуального управления от уровня помех, действующих на объект. Пусть задание имеет вид ступенчатого воздействия, а помеха, действующая на объект, равна 7 %.

Ошибка регулирования для случая, представленного на рис. 5, равна 0,167. Как можно заметить, непараметрический алгоритм дуального управления устойчив к внешним воздействиям, хотя, естественно, ошибка регулирования возросла по сравнению с предыдущим случаем.

Представим случай, когда x^* задается случайным образом (рис. 6).

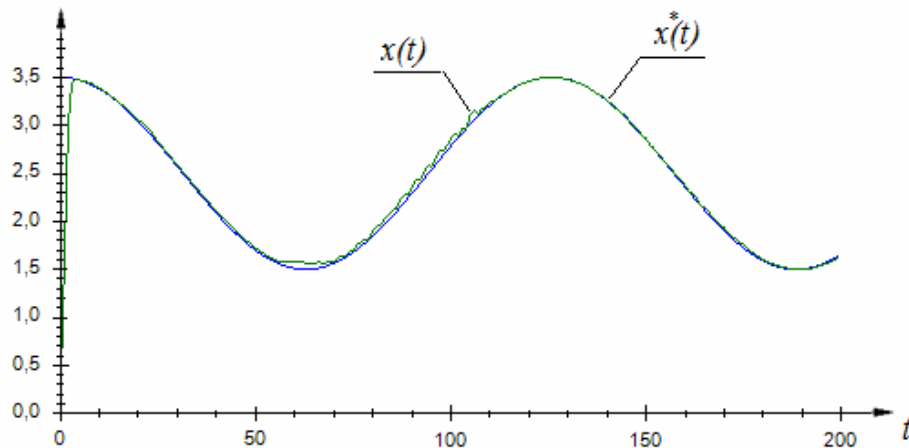


Рис. 2. Результаты управления при задающем воздействии в виде траектории

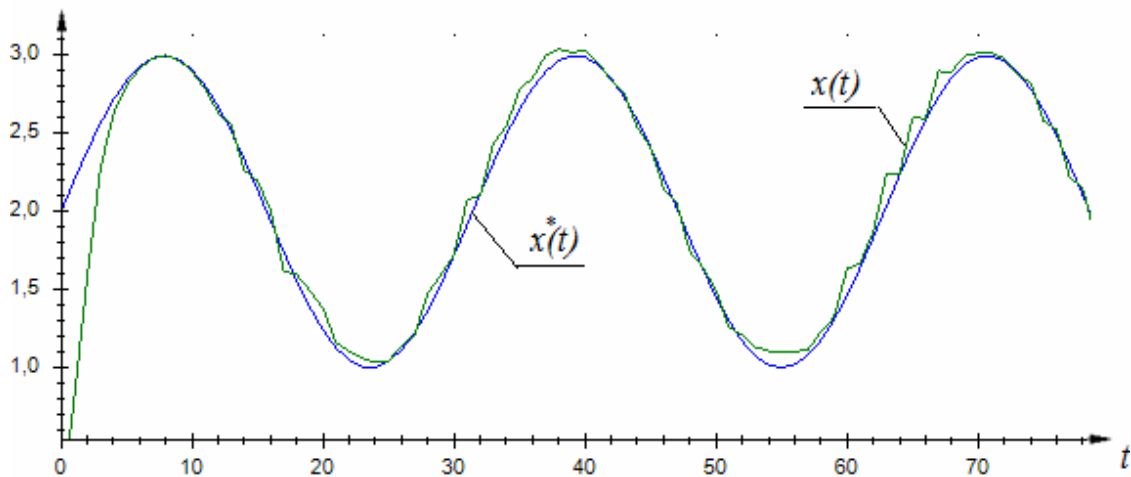


Рис. 3. Результаты управления при задающем воздействии в виде траектории при увеличении частоты колебаний задания

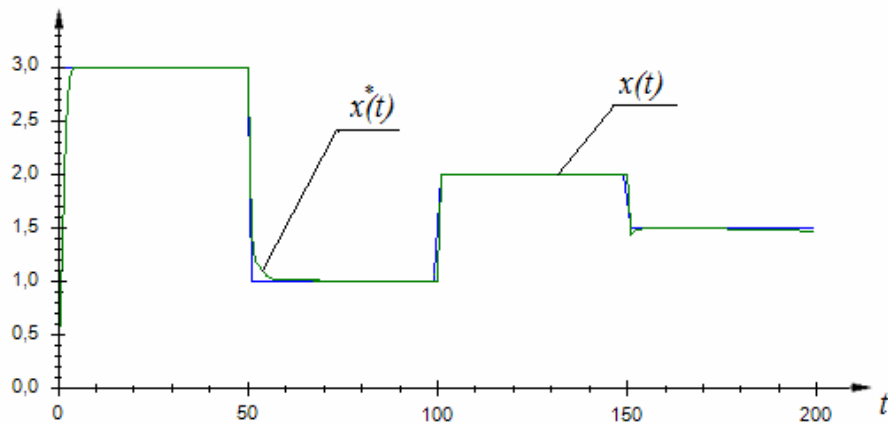


Рис. 4. Результаты управления при задающем воздействии в виде ступеньки

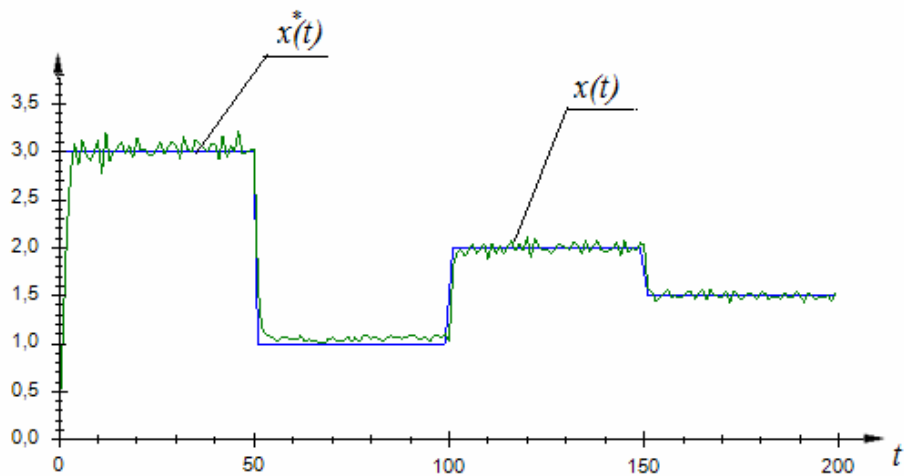


Рис. 5. Результаты управления при задающем воздействии в виде ступеньки, помеха 7 %

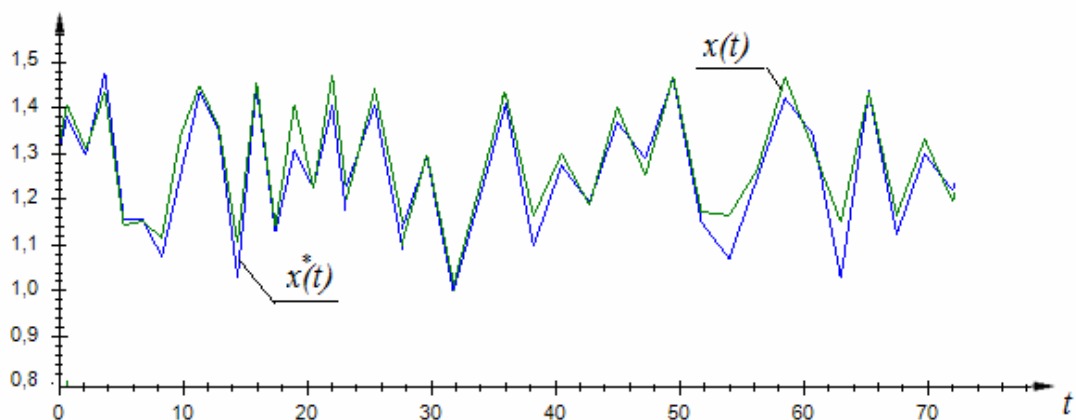


Рис. 6. Результаты управления при задающем воздействии в виде случайного задания

На рис. 6 показано, как ведет себя алгоритм при случайном задании. Видно хорошее качество управления с помощью непараметрического регулятора даже при таком «экзотическом» варианте, когда задание носит случайный характер. С подобной задачей

не справится ни один из известных регуляторов. На практике такой вариант задающего воздействия не встречается, однако это представляет интерес с теоретической точки зрения.

Заключение. Подводя итог настоящей статьи, следует заметить, что рассматривается очень важная с практической точки зрения задача управления в замкнутом контуре для дискретно-непрерывных процессов в условиях непараметрической неопределенности. Предлагаются непараметрические алгоритмы дуального управления, представляющие последовательность покомпонентного вычисления управляющих воздействий при измеряемых неуправляемых входных переменных. Достаточно подробно изложены результаты численного исследования.

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.
2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 683 с.
3. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М. : Наука. Физматлит, 1995. 336 с.
4. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 4–9.
5. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Общий подход // Вестник СибГАУ. 2008. № 3 (20). С. 65–69.
6. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 174 с.
7. Орлов В. И., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. Техническая диагностика электрорадиоизделий // Труды XII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ–2014) (16–19 июня 2014, г. Москва). С. 7676–7682.
8. О непараметрическом управлении стохастическими объектами с памятью / А. В. Банникова, [и др.] // Вестник СибГАУ. 2014. № 3 (55). С. 28–35.
9. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.
10. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление-I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 57–63.
11. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы / Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 4–9.
12. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление-II // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 85–90.
13. Medvedev A. V. Identification and control for linear dynamic system of unknown order/ Optimization Techniques IFIP Technical Conference (july 1–7, 1974, Novosibirsk). P. 48–55.
14. Eddy W. F. Optimum kernel estimators of the mode // Ann. Math. Statist. 1980. №. 8. P. 870–882.
15. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд. Тбил. ун-та, 1983. 194 с.

References

1. Tsyppkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh*. [Adaptation and learning in automatic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.
2. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya*. [Identity-based control systems]. Moscow, Mir Publ, 1975, 683 p.
3. Tsyppkin Ya. Z. *Informatsionnaya teoriya identifikatsii* [Information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ, 1995. 336 p.
4. Medvedev A. V. [The theory of nonparametric systems. Simulation]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 4 (30), P. 4–9 (In Russ.).
5. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. The general approach]. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 3 (20), P. 65–69 (In Russ.).
6. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii*. [Nonparametric system adaptation]. Novosibirsk, Nauka Publ, 1983, 174 p.
7. Orlov V. I., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. [Technical diagnostics electrical radio]. *Trudy XII vsrossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2014*. [Proceedings XII National Conference on Control VSPU 2014]. Moscow, 16–19 June, 2014, P. 7676–7682.
8. Bannikova A. V. et al. [On the non-parametric stochastic control objects with memory]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 3 (55), P. 28–35 (In Russ.).
9. Fel'dbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nyh avtomaticheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow. Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.
10. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-I]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 2 (48), P. 57–63 (In Russ.).
11. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Processes]. *Vestnik SibGAU*, 2010, No. 3 (29) p. 4–9. (In Russ.).
12. Medvedev A. V. [The theory of non-parametric systems. Control-II]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 85–90 (In Russ.).
13. Medvedev A. V. Identification and control for linear dynamic system of unknown order. *Optimization Techniques IFIP Technical Conference*. Novosibirsk, july 1–7, 1974, P. 48–55
14. Eddy W. F. [Optimum kernel estimators of the mode]. *Ann. Math. Statist.* 1980, No. 8, P. 870–882.
15. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie otsenki plotnosti veroyatnosti i krivoy regressii* [Nonparametric estimation of probability density and the regression curve], Tbilisi, izd. Tbil. un-t Publ., 1983, 194 p.

**НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕНИЯ МЕТОДА МОМЕНТОВ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ
ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ В ВИДЕ ОРТОГОНАЛЬНОГО РЯДА**

В. В. Браништи

Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: branishti-v-v@yandex.ru

Рассматривается задача оценивания функции плотности вероятности непрерывной случайной величины. Обсуждается актуальность данной задачи для науки и техники, в том числе для аэрокосмической отрасли. Рассматривается построение оценки функции плотности вероятности в виде ряда ортонормированных функций. Исследуется применение метода моментов для статистического оценивания коэффициентов ряда, а также предлагается его обобщение. В рамках применения метода моментов используются последовательные начальные моменты случайной величины. В этом случае расчёт оценок коэффициентов ряда сводится к решению системы линейных уравнений. Приводится доказательство теоремы о том, что при определённых условиях выбора ортонормированной системы функций предлагаемое обобщение метода моментов включает, как частные случаи, классический метод моментов, а также более распространённый метод оценивания коэффициентов в виде выборочных средних от ортонормированных функций. Показано, что при использовании ортонормированной системы Лежандра рассмотренные методы тождественны. Исследованы свойства построенных оценок, найдены их математические ожидания и ковариационная матрица. Показано, что в некоторых случаях оценки коэффициентов ряда являются смещёнными. Рассчитанные предложенным подходом оценки коэффициентов ряда были использованы для построения оценки функции плотности вероятности. Приводятся результаты численных расчётов значения функционала качества для построенных оценок функции плотности вероятности. Расчёты выполнены для случайной величины, подчинённой равномерному закону распределения. Произведено сравнение с известным методом оценивания коэффициентов при использовании чебышёвской и тригонометрической ортонормированных систем. Показано, что на малых выборках обобщённый метод моментов даёт существенно лучший результат.

Ключевые слова: непараметрическая неопределённость, функция плотности вероятности, статистическое оценивание, ортогональные функции, метод моментов, матричный анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 566–571**SOME GENERALIZATIONS OF METHOD OF MOMENTS
IN PROBABILITY DENSITY ESTIMATION BY ORTHOGONAL SERIES**

V. V. Branishti

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: branishti-v-v@yandex.ru

A problem of probability density function estimation for continuous random variable is considered in the paper. Actuality of this problem for science and technology including aerospace branch is discussed. Building of the probability density functions estimation by orthonormal series is considered. Applying of the method of moments to statistical estimating series coefficients is investigated, and some generalizations are suggested. Within the scope of method of moments the author uses consecutive ordinary moments of random variable. In this case the calculation of series coefficients estimations is reduced to solving system of linear equations.

The paper has the proof of the theorem that in specified conditions of orthonormal system choice, suggested generalization of the method of moments includes the ordinary method of moments and also more widespread estimating coefficients method by sample means of orthonormal functions as particular cases. The paper shows that in the case of using Legendre's orthonormal system the considered methods are identical. The properties of built estimations are researched, mathematical expectations and covariance matrix are founded. The paper shows that in particular cases the estimations of series coefficients are biased. The estimations of series coefficients, which are calculated by suggested

method, were used for building estimation of probability density function. The paper has results of numerical calculations of quality functional values for built estimations of probability density function. The calculations are carried out for uniformly distributed random value. The author compares the suggested method with the widespread estimating method with using Chebyshev's and trigonometric orthonormal systems. Research shows that generalized method of moments gives substantially better result on small samples.

Keywords: nonparametric indeterminacy, probability density function, statistical estimation, orthogonal functions, method of moments, matrix analysis.

Введение. Задача оценивания неизвестной функции плотности вероятности уже долгое время является важной научно-технической задачей [1]. От качества получаемых оценок плотности вероятности зависит качество основанных на ней алгоритмов классификации, распознавания образов, восстановления зависимостей и др. Кроме того, различные подходы к оцениванию плотности вероятности применяются при решении задач диагностики, часто встречающихся в аэрокосмической технике. Классический подход к оцениванию состоит в том, что подбирается модельный закон, который наилучшим образом описывает данную выборочную совокупность [2]. Однако в этом случае качество оценок существенно ухудшается при сложной структуре закона распределения случайной величины, например, если функция плотности многоэкстремальна, разрывна и т. п.

При отсутствии априорной информации о виде закона распределения используются непараметрические оценки функции плотности вероятности. Наиболее распространены ядерные оценки, основанные на работах Розенблатта [3] и Парзена [4], а также оценки в виде ряда ортонормированных функций, называемые проекционными оценками [5]. В последнем случае предполагается, что истинная плотность $f(x)$ принадлежит функциональному гильбертову пространству L_2 [6]. Предположим сверх этого, что значения исследуемой случайной величины ξ с вероятностью 1 заключены в некотором отрезке. Не умаляя общности, будем считать, что $\xi \in [-1; 1]$.

Проекционная оценка плотности вероятности имеет вид

$$\hat{f}_N(x) = a_0\varphi_0(x) + \dots + a_N\varphi_N(x), \quad (1)$$

где $\{\varphi_j\}_{j=0}^{\infty}$ – полная система ортонормированных функций пространства L_2 ; a_j – коэффициенты, оцениваемые по выборке случайной величины ξ ; N – параметр, характеризующий длину ряда ортонормированных функций, также подлежащий настройке. Как показывают численные расчёты, как коэффициенты a_j , так и параметр N существенно влияют на качество оценки (1).

Так как оптимальными коэффициентами для оценки (1) являются коэффициенты Фурье

$$\alpha_j = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_j(x) f(x) dx = M\{\varphi_j(\xi)\}, \quad j = 0, \dots, N, \quad (2)$$

то часто оценки a_j коэффициентов строятся в виде выборочных средних значений функций $\varphi_j(x)$:

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_j(x_i), \quad j = 0, \dots, N, \quad (3)$$

где $x_1, \dots, x_n$ – независимая выборка случайной величины ξ [7]. В [8] показано, что при использовании оценок (3) существует конечное оптимальное значение параметра N .

Кроме рассмотренного подхода к построению оценок a_j возможно применение метода моментов [9]. В настоящей работе используются начальные моменты случайной величины ξ . Так, приравняем оценки начальных моментов, рассчитанные по выборке, к их теоретическим значениям, рассчитанным с использованием оценки $\hat{f}_N(x)$ в качестве функции плотности вероятности:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}_N(x) dx = 1, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x \hat{f}_N(x) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \\ \vdots \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x^N \hat{f}_N(x) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^N. \end{cases}$$

Подставляя вместо оценки $\hat{f}_N(x)$ её выражение (1), получим систему из $(N+1)$ линейных уравнений с $(N+1)$ неизвестными:

$$\begin{cases} a_0(1, \varphi_0) + a_1(1, \varphi_1) + \dots + a_N(1, \varphi_N) = 1, \\ a_0(x, \varphi_0) + a_1(x, \varphi_1) + \dots + a_N(x, \varphi_N) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \\ \vdots \\ a_0(x^N, \varphi_0) + a_1(x^N, \varphi_1) + \dots + a_N(x^N, \varphi_N) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^N, \end{cases} \quad (4)$$

где $(x^i, \varphi_j) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^i \varphi_j(x) dx$ – скалярное произведение в пространстве L_2 . Введя матричные обозначения

$$B = \{(x^i, \varphi_j)\}_{i,j=0}^N, \quad a = (a_0, \dots, a_N)^T, \quad \hat{v} = (1, \dots, \hat{v}_N)^T,$$

систему (4) можно переписать в виде

$$Ba = \hat{v}. \quad (4a)$$

Эта система имеет единственное решение, если матрица B не вырождена [10]. В работе теоретически показано, что если используется система многочленов Лежандра, ортонормированная на отрезке $[-1; 1]$, то матрица B не вырождена при любых конечных $N \geq 0$.

Численно проверено, что для системы Чебышёва [11] и тригонометрической системы [12] матрица B не вырождена по крайней мере при $N \leq 40$. Тогда решение системы (4а) может быть записано в виде

$$a = B^{-1} \hat{v}. \quad (5)$$

Данное решение, полученное методом моментов, может быть использовано для построения оценки функции плотности вероятности в виде выражения (1).

Обобщение метода моментов. Данный подход допускает следующее обобщение. Возьмём произвольное целое $N' \geq N$ и рассчитаем матрицу

$$B_{N'} = \left\{ (x^i, \varphi_j) \right\}_{i,j=0}^{N'} = \begin{pmatrix} (1, \varphi_0) & \dots & (1, \varphi_{N'}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x^{N'}, \varphi_0) & \dots & (x^{N'}, \varphi_{N'}) \end{pmatrix}$$

размерности $(N'+1) \times (N'+1)$. Обратную к ней матрицу обозначим через $B_{N'}^{-1}$. Выделив в ней подматрицу $B_{N,N'}^{-1}$, содержащую первые $(N+1)$ её строк, и умножив её на вектор из $(N'+1)$ первых начальных выборочных моментов $\hat{v}$, получим вектор

$$a^{(N')} = B_{N,N'}^{-1} \hat{v}, \quad (6)$$

значения которого наряду со значениями (3) и (5) могут использоваться в качестве оценок коэффициентов для (1). Более того, справедлива следующая теорема.

Теорема. Пусть система $\{\varphi_i\}_{i=0}^{\infty}$ удовлетворяет следующему условию:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left(\|B_N^{-1}\|_{\infty} \max_{0 \leq k \leq N} \left| x^k - \sum_{i=0}^N (x^k, \varphi_i) \varphi_i(x) \right| \right) = 0$$

при $x \in (-1; 1)$, (7)

где $\|\cdot\|_{\infty}$ – матричная норма, индуцированная векторной l_{∞} -нормой [13]. Тогда при неограниченном увеличении N' и фиксированном N оценка (6) сходится по вероятности к оценке (3):

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \lim_{N' \rightarrow \infty} P \left\{ \left| a_j^{(N')} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_j(x_i) \right| > \varepsilon \right\} = 0,$$

где $0 \leq j \leq N$. (8)

Доказательство. Докажем более сильное утверждение:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \lim_{N' \rightarrow \infty} P \left\{ \|B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi}\|_{\infty} > \varepsilon \right\} = 0, \quad (9)$$

где

$$\hat{v}_{\varphi} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_0(x_i), \dots, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_N(x_i) \right)^T.$$

Для этого заметим, что

$$\|B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi}\|_{\infty} = \|B_{N'}^{-1} (\hat{v} - B_{N,N'} \hat{v}_{\varphi})\|_{\infty} \leq \|B_{N'}^{-1}\|_{\infty} \|\hat{v} - B_{N,N'} \hat{v}_{\varphi}\|_{\infty}.$$

В свою очередь,

$$\hat{v} - B_{N,N'} \hat{v}_{\varphi} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{N'} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (1, \varphi_0) & (1, \varphi_1) & \dots & (1, \varphi_{N'}) \\ (x, \varphi_0) & (x, \varphi_1) & \dots & (x^{N'}, \varphi_{N'}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x^{N'}, \varphi_0) & (x^{N'}, \varphi_1) & \dots & (x^{N'}, \varphi_{N'}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_0(x_i) \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_1(x_i) \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{N'}(x_i) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \sum_{j=0}^{N'} (1, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right) \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=0}^{N'} (x, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right) \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i^{N'} - \sum_{j=0}^{N'} (x^{N'}, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right) \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} 1 - \sum_{j=0}^{N'} (1, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \\ x_i - \sum_{j=0}^{N'} (x, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \\ \vdots \\ x_i^{N'} - \sum_{j=0}^{N'} (x^{N'}, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned} \|\hat{v} - B_{N,N'} \hat{v}_{\varphi}\|_{\infty} &= \max_{0 \leq k \leq N'} \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right) \right| \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right| \\ &\leq \max_{1 \leq i \leq n} \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right|. \end{aligned}$$

Тогда

$$P \left\{ \|B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi}\|_{\infty} > \varepsilon \right\} \leq P \left\{ \|B_{N'}^{-1}\|_{\infty} \max_{1 \leq i \leq n} \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right| > \varepsilon \right\}. \quad (10)$$

Возьмём теперь произвольное $\varepsilon > 0$. В силу условия (7) с возрастанием N' выражение

$$\left\| B_{N'}^{-1} \right\|_{\infty} \max_{1 \leq i \leq n} \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x_i^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right|$$

может быть сделано меньшим ε , лишь только все $x_i \in (-1; 1)$. Однако для любой непрерывной случайной величины, распределённой на отрезке $[-1; 1]$, включение всех $x_i \in (-1; 1)$ выполнено с вероятностью 1. Таким образом,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left\| B_{N'}^{-1} \right\|_{\infty} \max_{1 \leq i \leq n} \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x_i^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right| < \varepsilon \right\} = 1$$

или

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \left\| B_{N'}^{-1} \right\|_{\infty} \max_{1 \leq i \leq n} \max_{0 \leq k \leq N'} \left| x_i^k - \sum_{j=0}^{N'} (x_i^k, \varphi_j) \varphi_j(x_i) \right| > \varepsilon \right\} = 0.$$

Теперь, переходя к пределу в неравенстве (10), получим формулу (9).

Неравенство $\left\| B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi} \right\|_{\infty} > \varepsilon$ означает, что каждая компонента вектора $B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi}$ больше ε . Отсюда следует, в частности, выполнение этого неравенства для первых $(N+1)$ компонент. Таким образом,

$$\begin{aligned} & \lim_{N' \rightarrow \infty} P \left\{ \left| a_j^{(N')} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_j(x_i) \right| > \varepsilon \right\} \leq \\ & \leq \lim_{N' \rightarrow \infty} P \left\{ \left\| B_{N'}^{-1} \hat{v} - \hat{v}_{\varphi} \right\|_{\infty} > \varepsilon \right\} = 0, \quad 0 \leq j \leq N. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Из доказанного следует, что при условии (7) рассматриваемое обобщение метода моментов включает метод (3) как частный случай при $N' \rightarrow \infty$. Поэтому для оценок (3) вводится обозначение $a^{(\infty)}$. С другой стороны, очевидно, что при $N' = N$ метод совпадает с обычным методом моментов. Для оценок функции плотности вероятности с коэффициентами (6) и (3) вводятся, соответственно, обозначения $\hat{f}_N^{(N')}(x)$ и $\hat{f}_N^{(\infty)}(x)$.

Можно показать, что для систем Лежандра, Чебышёва и тригонометрической системы выполняется условие (7). Причём для системы Лежандра выражение под пределом в (7) равно 0 при любом $N \geq 0$. Действительно, для системы Лежандра имеем

$$\begin{aligned} x^k &= \sum_{i=0}^k c_i \varphi_i(x) = \sum_{i=0}^k (x^k, \varphi_i) \varphi_i(x) \text{ при } x \in (-1; 1), \\ k &= 0, 1, 2, \dots; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left\| B_N^{-1} \right\|_{\infty} \max_{0 \leq k \leq N} \left| x^k - \sum_{i=0}^N (x^k, \varphi_i) \varphi_i(x) \right| = \\ & = \left\| B_N^{-1} \right\|_{\infty} \max_{0 \leq k \leq N} |x^k - x^k| = \left\| B_N^{-1} \right\|_{\infty} \cdot 0 = 0. \end{aligned}$$

Поэтому при использовании системы Лежандра оценки, полученные по обобщённому методу моментов при любом N' , совпадают с оценками (3).

Далее в статье предполагается, что система ортонормированных функций выбрана таким образом, что условие (7) выполнено.

Свойства оценок. Найдём математические ожидания оценок (6):

$$M \{ a^{(N')} \} = M \{ B_{N,N'}^{-1} \hat{v} \} = B_{N,N'}^{-1} M \{ \hat{v} \}.$$

Так как

$$\begin{aligned} M \{ \hat{v} \} &= (M \{ \hat{v}_0 \}, M \{ \hat{v}_1 \}, \dots, M \{ \hat{v}_{N'} \})^T = \\ &= \left(M \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^0 \right\}, M \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^1 \right\}, \dots, M \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{N'} \right\} \right)^T = \\ &= (1, M \{ \xi \}, \dots, M \{ \xi^{N'} \})^T = v, \end{aligned}$$

то получаем окончательно

$$M \{ a^{(N')} \} = B_{N,N'}^{-1} v.$$

При $N' \rightarrow \infty$ получаем, что оценка является несмещённой:

$$\begin{aligned} & \lim_{N' \rightarrow \infty} M \{ a^{(N')} \} = M \{ a^{(\infty)} \} = \\ &= M \left\{ \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_0(x_i), \dots, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_N(x_i) \right)^T \right\} = \\ &= (M \{ \varphi_0(\xi) \}, \dots, M \{ \varphi_N(\xi) \})^T = \alpha. \end{aligned}$$

При конечных N' оценка (6), в общем случае, смещена.

Рассчитаем ковариационную матрицу оценок:

$$\begin{aligned} \Sigma \{ a^{(N')} \} &= \Sigma \{ B_{N,N'}^{-1} \hat{v} \} = B_{N,N'}^{-1} \Sigma \{ \hat{v} \} (B_{N,N'}^{-1})^T = \\ &= \frac{1}{n} B_{N,N'}^{-1} \Sigma_{\xi} (B_{N,N'}^{-1})^T, \end{aligned}$$

где Σ_{ξ} – ковариационная матрица степеней случайной величины ξ :

$$\Sigma_{\xi} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D\{\xi\} & \dots & \text{cov}\{\xi, \xi^{N'}\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \text{cov}\{\xi^{N'}, \xi\} & \dots & D\{\xi^{N'}\} \end{pmatrix}.$$

Переходя к пределу при $N' \rightarrow \infty$, получим ковариационную матрицу оценок (6):

$$\lim_{N' \rightarrow \infty} \Sigma \{ a^{(N')} \} = \Sigma \{ a^{(\infty)} \} = \frac{1}{n} \Sigma_{\varphi},$$

где Σ_{φ} – ковариационная матрица функций $\{\varphi_0(x), \dots, \varphi_{N'}(x)\}$ от случайной величины ξ :

$$\Sigma_{\varphi} = \begin{pmatrix} D\{\varphi_0\} & \text{cov}\{\varphi_0, \varphi_1\} & \dots & \text{cov}\{\varphi_0, \varphi_{N'}\} \\ \text{cov}\{\varphi_1, \varphi_0\} & D\{\varphi_1\} & \dots & \text{cov}\{\varphi_1, \varphi_{N'}\} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}\{\varphi_{N'}, \varphi_0\} & \text{cov}\{\varphi_{N'}, \varphi_1\} & \dots & D\{\varphi_{N'}\} \end{pmatrix}.$$

Отсюда видно, что при неограниченном увеличении объёма выборки n дисперсии оценок стремятся

к 0. Тогда из теоремы Чебышёва [9] оценки $a^{(\infty)}$ являются состоятельными.

Применение оценок. Несмотря на отсутствие при конечных N' для оценок $a^{(N')}$ таких свойств, как несмещённость и состоятельность, в некоторых случаях, особенно на малых выборках, оценка плотности вероятности $\hat{f}_N^{(N')}(x)$ всё же оказывается лучше, чем оценка $\hat{f}_N^{(\infty)}(x)$. Близость оценки $\hat{f}_N^{(N')}(x)$ к истинной плотности $f(x)$ характеризуется усреднённым квадратичным критерием [14]:

$$Q\{\hat{f}_N^{(N')}\} = M\left\{\left\|\hat{f}_N^{(N')} - f\right\|^2\right\}.$$

После преобразований получаем следующее выражение [8]:

$$Q\{\hat{f}_N^{(N')}\} = \|f - f_N\|^2 + \sum_{j=0}^N \left(\alpha_j - M\{a_j^{(N')}\} \right)^2 + \sum_{j=0}^N D\{a_j^{(N')}\}, \quad (11)$$

где $f_N(x)$ – оценка плотности вероятности с оптимальными коэффициентами:

$$f_N(x) = \alpha_0 \varphi_0(x) + \dots + \alpha_N \varphi_N(x). \quad (12)$$

Выражение (11) позволяет значительно ускорить процесс вычисления значения критерия Q для данной ортонормированной системы $\{\varphi_i\}$ и данной плотности вероятности $f(x)$.

Обобщённый метод моментов был применён при восстановлении различных законов распределения вероятностей. Графики зависимости разности между значением критерия (11) для оценки $\hat{f}_N^{(\infty)}(x)$ и оценки $\hat{f}_N^{(N')}(x)$ при оптимальном N' представлены на рис. 1 и 2. Рассматривалась задача восстановления равномерного закона распределения на отрезке $[0; 0,5]$. Результаты получены при малом объёме выборки $n = 20$.

Из графиков видно, что на малых объёмах выборки обобщённый метод моментов при оптимально настроенных конечных N' в широком диапазоне значений N даёт существенное улучшение качества оценки функции плотности вероятности.

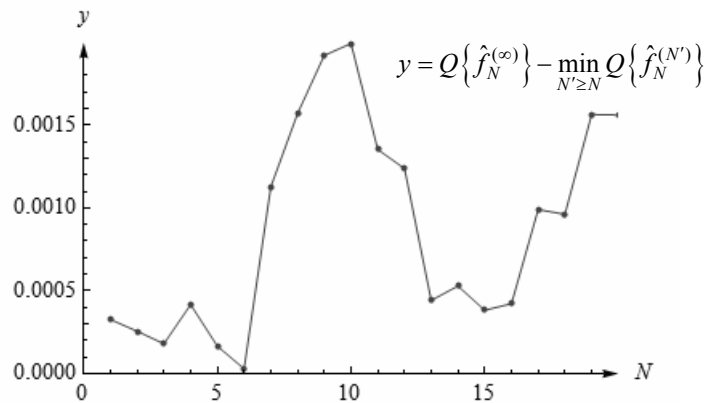


Рис 1. Сравнение качества аппроксимации при восстановлении плотности вероятности методами (3) и (6) с использованием ортонормированной системы Чебышёва

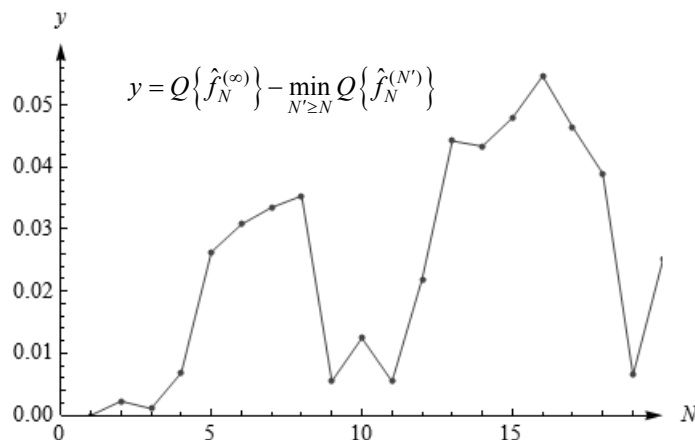


Рис 2. Сравнение качества аппроксимации при восстановлении плотности вероятности методами (3) и (6) с использованием ортонормированной тригонометрической системы

Заключение. В ходе исследования было разработано обобщение метода моментов для оценивания коэффициентов проекционной оценки (1) функции плотности вероятности, для которого методы оценивания (3) и (5) являются частными случаями. В некоторых случаях, особенно при малых объемах выборки исследуемой случайной величины, удалось добиться улучшения оценки плотности вероятности по сравнению с наиболее часто используемым методом (3), несмотря на отсутствие у оценок коэффициентов таких свойств, как несмещенность и состоятельность. Здесь уместно замечание известного советского математика В. Н. Вапника: «Ниоткуда не следует, что в классе несмещенных оценок плотности имеются достаточно хорошие оценки. Ведь, как уже отмечалось, само свойство несмещенности оценки не имеет никакой самостоятельной ценности и вводится исключительно в целях ограничения класса оценок» [15].

Библиографические ссылки

1. Акимов С. С. Методы решения задачи восстановления плотности вероятности по выборке из генеральной совокупности // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 1 (13). С. 29–35.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
3. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1956. Vol. 27, № 3. P. 832–837.
4. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1962. Vol. 35, № 3. Pp. 1065–1076.
5. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. М. : Физматлит, 1972. 520 с.
6. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. 6-е изд., испр. М. : Наука, 1989. 624 с.
7. Ченцов Н. Н. Оценка неизвестной плотности распределения по наблюдениям // *ДАН СССР*. 1962. Т. 147, № 1. С. 45–48.
8. Новосёлов А. А. Об оптимальном выборе структуры функции плотности вероятности и регрессии : препринт. Красноярск : ВЦ СО АН СССР, 1979. 31 с.
9. Крамер Г. Математические методы статистики : пер. с англ. 2-е изд., стер. М. : Мир, 1975. 648 с.
10. Мальцев А. И. Основы линейной алгебры. 3-е изд. М. : Наука, 1970. 400 с.
11. Никифоров А. Ф., Уваров В. Б. Специальные функции математической физики. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1984. 344 с.
12. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. 8-е изд. М. : Физматлит, 2003. Т. 3. 728 с.
13. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 655 с.

14. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // *Теория вероятностей и её применения*. 1969. Т. 14, № 1. С. 156–162.

15. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М. : Наука, 1979. 448 с.

References

1. Akimov S. S. [Methods of probability density function recovering with sample of the entire assembly]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire*. 2014, Vol. 1 (13), P. 29–35 (In Russ.).
2. Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika: dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics: for engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 816 p.
3. Rosenblatt M. [Remarks on some nonparametric estimates of a density function]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1956, Vol. 27, 3, P. 832–837.
4. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1962, Vol. 35, No. 3, P. 1065–1076.
5. Chentsov N. N. *Statisticheskie reshayushchie pravila i optimal'nye vyvody* [Statistical decision rules and optimal conclusions]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1972, 520 p.
6. Kolmogorov A. N., Fomin S. V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of function theory and function analysis]. 6th edition. Moscow, Nauka Publ., 1989, 624 p.
7. Chentsov N. N. [Estimation of unknown probability density function on observations]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1962, Vol. 147, No. 1, P. 45–48 (In Russ.).
8. Novoselov A. A. *Ob optimal'nom vybere struktury funktsii plotnosti veroyatnosti i regressii: preprint* [On optimal choice of probability density function and regression structure: preprint]. Krasnoyarsk, Computational Centre of Siberian Department Academy of Science USSR Publ., 1979, 31 p.
9. Cramér H. *Mathematical methods of statistics*. Princeton University Press, 1946, 575 p.
10. Maltsev A. I. *Osnovy lineynoy algebrы* [Basics of linear algebra], 3rd ed. Moscow, Nauka Publ., 1970, 400 p.
11. Nikiforov A. F., Uvarov V. B. *Spetsial'nye funktsii matematicheskoy fiziki* [Special functions of mathematical physics], 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1984, 344 p.
12. Fikhtengol'ts G. M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. 8th ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, Vol. 3, 728 p.
13. Horn R., Johnson C. *Matrix analysis*. Cambridge University Press, 1990, 561p.
14. Epanechnikov V. A. [Nonparametric estimation of a multidimensional probability density]. *Teoriya veroyatnostey i ee prilozheniya*, 1969, Vol. 14, No. 1, P. 156–162 (In Russ.).
15. Vapnik V. N. *Vosstanovleniye zavisimostey po empiricheskim dannym* [Dependences recovery from empirical data]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 448 p.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРЕЦЕДЕНТНОГО АНАЛИЗА
В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

В. Г. Жуков*, А. А. Шаляпин, М. М. Соколов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com

Представлено решение актуальной практической задачи определения стратегии реагирования на инциденты информационной безопасности в информационных системах с помощью прецедентного анализа. Рассмотрен процессный подход к управлению инцидентами и его основные стадии. Процесс управления инцидентами, согласно требованиям нормативных документов, включает четыре этапа: обнаружение инцидента, реагирование на инцидент, расследование, корректирующие действия. На втором этапе процесса управления инцидентами существует актуальная проблема оперативного реагирования на инциденты информационной безопасности. Необходимо решить, какую стратегию из множества заданных выбрать, либо определить, что подходящей стратегии не существует и ее необходимо сформировать. В качестве решения проблемы выбора стратегии реагирования предлагается использовать аппарат прецедентного анализа. Для решения данной задачи предполагается применение упрощенного цикла рассуждения на основе прецедентов, который не включает этап адаптации сценариев реагирования. Классификация основана на количестве найденных аналогий и значении степени подобия. Инциденты сопоставляются классам прецедентов на основе найденных аналогий в каждом классе. По значению степени подобия инциденту ставится в соответствие конкретный прецедент из класса и связанная с ним стратегия реагирования. В соответствии с предложенной концепцией анализа инцидентов разработан новый алгоритм классификации инцидентов информационной безопасности в информационных системах на базе прецедентного и статистического анализа. Разработанный алгоритм отличается от известных автоматизированным выбором оптимального порогового значения с помощью ROC-анализа. Алгоритм предусматривает возможность выбора критерия максимального качества классификатора в зависимости от допустимого значения ошибок первого и второго рода. Проведена оценка эффективности разработанного алгоритма на множестве тестовых данных. Предложенная концепция построения системы прецедентного анализа позволяет повысить оперативность реагирования и многократно использовать ранее накопленный опыт в процессе управления инцидентами информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, инцидент, прецедент, стратегия реагирования, прецедентный анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 572–579**RESEARCH OF THE CASE ANALYSIS ALGORITHM
IN THE CLASSIFICATION OF PROBLEM OF INFORMATION SECURITY INCIDENTS**

V. G. Zhukov*, A. A. Shalyapin, M. M. Sokolov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com

The article is devoted to solution of the actual practical task of determining the strategy for responding to information security incidents in information systems with the help of case analysis. The author examines the process approach to incident management and its main stages. Incident management process, according to regulatory requirements, involves four steps: detection of an incident, incident response, investigation, corrective actions. At the second stage there is an urgent problem of a prompt response to information security incidents. It is necessary to decide which strategy should be chosen from a variety of specific strategies or to determine that there is no appropriate strategy and therefore it should be formed. As a solution of the problem of the response strategy selection it is proposed to use the case based analysis apparatus. To solve this problem it is supposed to use a simplified cycle of reasoning based on cases and not including the stage of response scenarios adaptation. The classification is based on the number of found analogies and the value of the similarity degree. Incidents are compared with case classes on the basis of similarities found in each

class. According to the degree of similarity an incident corresponds to a specific case in the class and the response strategy associated with it. A new algorithm for classification of information security incidents in information systems based on the case and statistical analysis was worked out in accordance with the proposed concept of incidents analysis. The developed algorithm differs from the well-known ones in automatic selection of the optimal threshold value using ROC-analysis. The algorithm allows the selection of the criterion of classifier maximum quality depending on the permissible value of errors of the first and second kind under the given circumstances. The assessment of the developed algorithm effectiveness was carried out. The proposed concept of building the case based system of information security incidents increases responsiveness and allows repetitive using of the previous experience in the process of information security incidents management.

Keywords: information security, incident, case, response strategy, case based analysis.

Введение. Процесс управления инцидентами информационной безопасности (ИБ) является важным источником данных для анализа эффективности системы защиты информации и планирования улучшений в ее работе. Необходимость управления инцидентами возникает не только в рамках обеспечения ИБ, но и при управлении ИТ-инфраструктурой в целом. Семейство государственных стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000–2005 описывает ряд требований к управлению инцидентами в ИТ-инфраструктуре [1; 2].

В международной практике существует большое количество рекомендаций, рассматривающих специфические вопросы управления инцидентами ИБ. Очевидно, что для конкретной организации существующие методологии имеют различную эффективность. Однако применяемая методология должна быть совместима с основными современными стандартами на системы управления, такими как ISO/IEC 27001 и ISO 20000. В рамках нормативной базы Российской Федерации, устанавливающей требования и рекомендации к реализации процесса управления инцидентами ИБ, основными стандартами являются ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 18044–2007. Кроме того, нормативные документы ФСТЭК России определяют базовый перечень мер, которые должны в том числе включать обнаружение, идентификацию, анализ инцидентов в информационной системе, а также принятие мер по реагированию, устранению и предупреждению инцидентов. Данные меры обязательны к реализации в системах защиты информации для информационных систем персональных данных 1 и 2 уровня защищенности, автоматизированных систем управления технологическими процессами, государственных информационных систем различных организаций, в том числе предприятий ракетно-космической отрасли.

Процесс управление инцидентами ИБ, согласно требованиям ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2013, основывается на цикле Демминга (Plan-Do-Study-Act – PDSA) и включает следующие стадии: обнаружение и регистрация инцидента, реагирование на инцидент, расследование, корректирующие и превентивные мероприятия. С точки зрения функционирования системы защиты информации особый интерес представляют первые две стадии.

В первую очередь необходимо своевременно обнаружить инцидент, иначе невозможно отреагировать на него в кратчайшие сроки. В то же время по инцидентам, которые были обнаружены и зарегистрированы, часто отсутствуют четкие процедуры реагирования. Подобные ситуации требуют значительного вре-

мени для их разрешения. Именно способность системы защиты идентифицировать инцидент и сценарий реагирования определяют ее адаптивность к угрозам и качество функционирования в целом. Таким образом, при автоматизированном управлении инцидентами ИБ существует актуальная проблема – определить, какой сценарий реагирования из множества заранее определенных применить, либо сделать вывод, что подходящего сценария не существует и его необходимо сформировать [3].

Прецедентный анализ инцидентов информационной безопасности. Вывод на основе прецедентов (Case-Based Reasoning – CBR) является подходом, позволяющим решить новую, неизвестную задачу, используя или адаптируя решение уже известной задачи. Таким образом, реализуется многократное использование накопленного опыта. В системах, основанных на прецедентах, поиск решения проблемы базируется на понятии аналогии (поиск от частного к частному). Рассуждение на основе аналогий определяется как метод вывода, позволяющий обнаружить подобие между несколькими заданными объектами и благодаря переносу фактов (знаний), справедливых для одних объектов, на основе этого подобия на другие объекты определить способ решения задачи или предсказать неизвестные факты [4–8].

Метод правдоподобного рассуждения позволит решить проблему реагирования на инциденты ИБ путем применения системы прецедентного анализа в качестве интегрированного средства автоматизации процесса управления инцидентами. Данный подход позволит повысить эффективность поиска сценариев реагирования и более интеллектуально подходить к процессу управления ИБ в целом [9].

Применение прецедентного анализа для совершенствования процесса управления инцидентами ИБ заключается в следующем: имеется множество известных инцидентов K и множество стратегий реагирования R . База прецедентов G представляет собой отображение $G: K \rightarrow R$, т. е. это информационная структура, состоящая из данных, описывающих инцидент и алгоритм его решения. При возникновении нового инцидента для него ищется прецедент, содержащий описание инцидента, достаточно близкого к текущему. Сценарий реагирования, включенный в найденный прецедент, используется или адаптируется для решения нового инцидента. Логическая структура цикла рассуждения на основе прецедентов (CBR-цикл) приведена на рис. 1. Предложенная концепция показала свою пригодность для решения задачи обнаружения и идентификации инцидентов ИБ [3; 9].

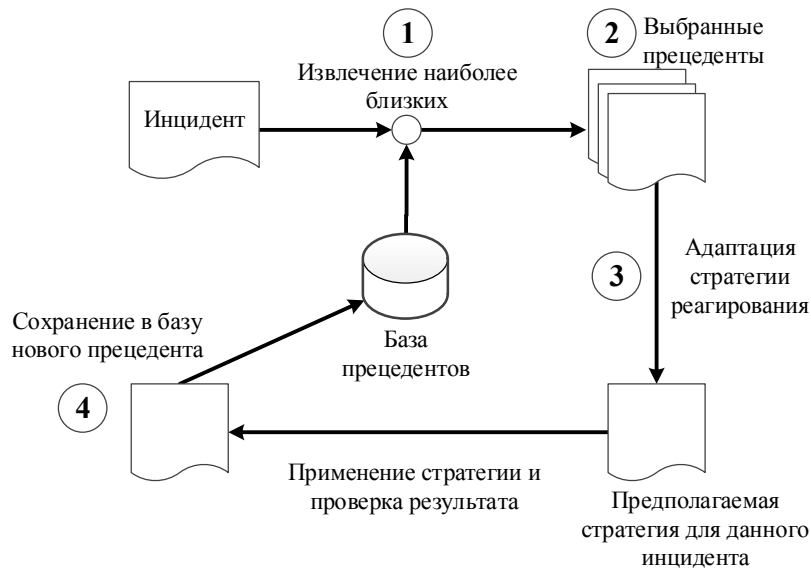


Рис. 1. Цикл рассуждения на основе прецедентов

Инциденты, не известные ранее и для которых нет определенной стратегии реагирования, будем называть аномальными инцидентами. Такие инциденты не имеют аналогов в рамках класса, к которому они отнесены средством защиты. Заключение об аномальности инцидента дает повод для его детального анализа.

Основная проблема математического обеспечения – проблема представления прецедента, заключающаяся в определении информации, которую необходимо включить в описание прецедентов, нахождении соответствующей структуры для описания содержания прецедента, а также определения, каким образом должна быть организована и индексируется база знаний прецедентов для эффективного поиска и многократного использования. Возможны различные подходы к представлению прецедентов: от записей в базах данных, древовидных структур, до предикатов и фреймов.

С точки зрения средств защиты информации инцидент ИБ представляет собой многомерный вектор, числовые параметры которого характеризуют состояние информационной системы, сетевого соединения или сервиса. Примерами параметров вектора могут служить время сетевого соединения, тип протокола, количество переданных/отправленных байтов в рамках TCP-соединения и т. д. Исходя из этого, наиболее эффективной структурой представления прецедентов для задачи обнаружения и анализа инцидентов ИБ будет являться параметрическое представление многомерным вектором:

$$CASE = (x_1, x_2, \dots, x_p, R),$$

где $x_1, \dots, x_p$ – параметры инцидента ИБ, описываемого данным прецедентом; R – одно или множество сценариев реагирования на соответствующий инцидент.

При параметрическом представлении извлечение прецедентов будет основываться на определении функции подобия (метрики) F , значение которой определяет сходство между инцидентом ИБ и прецен-

том из базы. В пространстве признаков определяется точка, соответствующая целевой проблеме, и в рамках используемой метрики выбирается ближайший прецедент. Формально аналогия прецедента $g = (x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gp})$ и текущей ситуации $k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kp})$ описывается функцией вида

$$SIM(g, k) = F(sim(x_{g1}, x_{k1}), \dots, sim(x_{gp}, x_{kp})),$$

где $sim(x_{gi}, x_{ki})$ – локальная схожесть значений i -го признака прецедента g и i -го признака текущей ситуации k . Функция F выражает схожесть прецедента с текущей ситуацией.

Таким образом, прецедентный анализ сводится к задаче классификации инцидентов на нормальные и аномальные, исходя из количества найденных аналогий [9; 10]. Пусть $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ – множество прецедентов; $g_i = (x_1, \dots, x_p, r_i)$ – единичный прецедент; $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ – множество зарегистрированных инцидентов; $k_j = (x_1, \dots, x_p)$ – единичный инцидент; $F(g_i, k_j)$ – функция подобия; $G_1 = \{g_i : F(g_i, k_j) \leq d_{lim}\}$ – множество подобных прецедентов (d_{lim} – это предельное значение расстояния, максимальное значение функции подобия прецедента и инцидента, при котором они считаются аналогичными). Каждый параметр x_i представляет собой некоторую характеристику, описывающую инцидент (длительность сетевого соединения, количество переданных байтов, идентификатор протокола), а r_i – соответствующий ему сценарий реагирования. Тогда условие отнесения инцидента к множеству прецедентов формулируется следующим образом:

$$k_j \in G \Leftrightarrow |G_1| \geq p_{lim},$$

с другой стороны, условие аномальности есть обратное неравенство

$$k_j \in G \Leftrightarrow |G_1| < p_{\text{lim}},$$

где p_{lim} – это предельное значение количества аналогий найденных в классе прецедентов, при котором инцидент считается нормальным относительно этого класса.

Условие принадлежности инцидента к классу G (т. е. вывод о том, что инцидент является нормальным в рамках данного класса) определяется следующим образом: инцидент принадлежит классу G в том случае, когда существует подмножество G_1 , элементами которого являются прецеденты, достаточно похожие на инцидент, и количество таких прецедентов не меньше заданного числа.

Сформулированная задача классификации инцидентов ИБ определяет алгоритм прецедентного анализа как бинарный классификатор. Анализируемое множество в результате процесса классификации разделяется на два класса. Нормальными инцидентами считаются те, которые однозначно соотносятся с определенным в базе прецедентов классом. Для таких инцидентов возможно автоматическое применение сценария реагирования.

Эффективность алгоритма анализа напрямую зависит от выбора ключевых параметров d_{lim} и p_{lim} . Выбор параметров алгоритма весьма противоречив. С одной стороны, увеличение p_{lim} повышает точность классификации нормальных инцидентов, но при этом границы между классами становятся менее четкими. Уменьшение же параметра d_{lim} также приводит к более точной классификации, но увеличивает вероятность ошибок второго рода [11; 12].

Статистический анализ прецедентов. Прецедентный анализ строится на предположении, что в рамках одного класса прецеденты находятся достаточно близко друг к другу. Так, для любых трех прецедентов произвольных классов $g_1, g_2 \in G_1$ и $g_3 \in G_2$ должны выполняться неравенства $F(g_1, g_2) < F(g_1, g_3)$ и $F(g_1, g_2) < F(g_2, g_3)$. Однако в ряде случаев данное условие нарушается. Для устранения этого недостатка правдоподобный вывод основывается не только на предельном показателе близости, но и на предельном количестве близких объектов.

Параметр d_{lim} является ключевым при определении аномальности. Как показывают предварительные исследования, вариация данного параметра в небольшом диапазоне значительно влияет на качество модели классификации. Исходя из этого, необходимо выявить зависимости предельного расстояния от статистических характеристик класса с целью формализации процедуры расчета предельного расстояния.

Формализуем определение следующих параметров: среднее расстояние прецедента до класса и расстояние класса (классовое расстояние).

Средним расстоянием прецедента до класса будем считать

$$d_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n-1},$$

т. е. среднее от значений расстояний конкретного i -го прецедента до остальных экземпляров сопоставляемого класса. Отсюда классовое расстояние определится как

$$d_{\text{class}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n},$$

т. е. среднее от расстояний всех прецедентов относительно сопоставляемого класса.

Таким образом, классовое расстояние примем за предельное значение функции аналогии. Для каждого класса прецедентов имеют место свои статистические оценки свойств класса, поэтому для каждого класса рассчитывается классовое расстояние и среднеквадратичное отклонение. При этом в грубом приближении предполагаем, что

$$F(t_j, g_i) \leq d_{\text{class}} + \sigma \Rightarrow t_j \in G.$$

Первичный статистический анализ класса заключается в расчете классового расстояния и среднеквадратичного отклонения. При этом проанализировано количество аномалий в классе, исходя из условия $F(t_j, g_i) \leq d_{\text{class}} + \sigma \Rightarrow t_j \in G$. Результаты анализа при расчете по метрике Евклида представлены на рис. 2.

По графическим результатам оценки расстояний прецедентов до класса видно, что расстояния основной массы экземпляров класса укладываются в диапазон верхней границы среднеквадратичного отклонения. В данном примере под аномалией понимается экземпляр класса, расстояние которого до собственного класса превышает $d_{\text{class}} + \sigma$.

Полученные показатели позволяют утверждать, что в рамках одного класса прецеденты являются аналогичными, кроме того, расстояния прецедентов до класса варьируются в некотором диапазоне. Идеальный случай – это случай, при котором среднее расстояние и среднеквадратичное отклонение стремятся к нулю. Результаты классификации будут более точные при условиях, для которых в рамках класса существует меньшее количество аномалий. При этом очевидно, p_{lim} для данного класса будет находиться в обратной зависимости со значением аномалий в классе.

Фрагмент проведенной оценки зависимости количества аномалий в классе от выбранной функции подобия для набора данных KDD Cup'99 приведен в табл. 1.

Таким образом, для множества метрик рассчитываются статистические показатели классов. Для конкретного класса применяется та метрика, в рамках которой количество аномалий минимально [13].

Применение ROC-анализа для настройки прецедентного классификатора. При рассчитанном значении d_{lim} и σ выбор предельного значения аналогий p_{lim} прецедентного классификатора может основываться на применении ROC-анализа (Receiver Operating Characteristic).

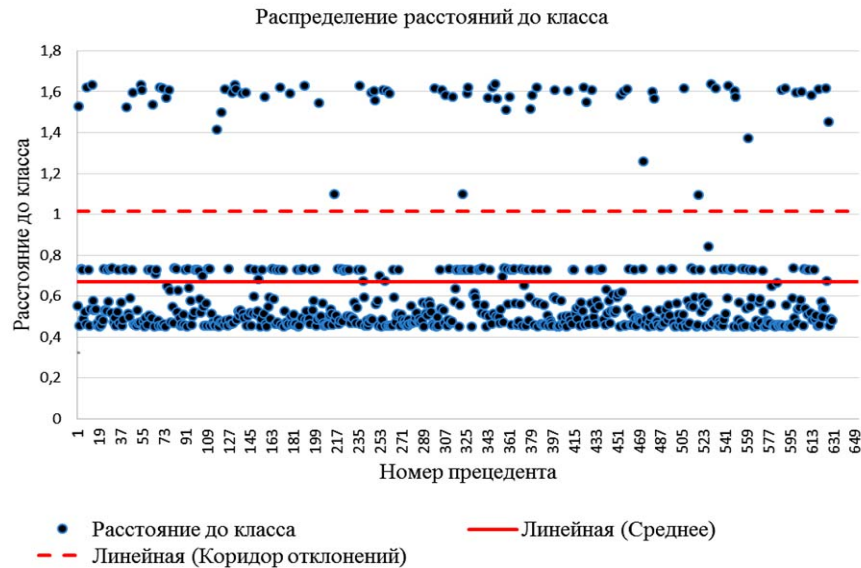


Рис. 2. Расстояния прецедентов до класса

Таблица 1

Зависимость количества аномалий от метрики

Класс прецедентов (мощность класса, шт.)	Количество аномалий, %	
	Функция Евклида	Манхэттенская метрика
Back (715)	19,161	18,881
Ipsweep (630)	12,063	11,587
Portswweep (353)	16,716	12,181
Teardrop (687)	15,451	17,784
Smurf (615)	13,192	14,169
Warezcclient (791)	20,859	20,353

ROC-анализ является аппаратом для оценки качества моделей классификации. Поскольку прецедентный классификатор является бинарным, то один из классов назовем классом с положительными исходами (аномальные инциденты), второй – с отрицательными исходами (нормальные инциденты) [14; 15].

Предполагается, что у классификатора имеется некоторый порог отсека – параметр, варьируя который, получаем то или иное разбиение на два класса. В прецедентном анализе инцидентов порог отсека представляется предельным значением аналогий p_{lim} и варьируется от 1 до мощности класса. В зависимости от его значения будут получаться различные величины ошибок I и II рода. Необходимо подобрать такое значение точки отсека (пороговое значение), которое дает наибольшую точность классификации.

Для понимания сути ошибок I и II рода в рамках существующей задачи рассмотрим таблицу сопряженности (табл. 2), которая строится на основе результатов классификации моделью и фактической (объективной) принадлежности инцидентов к классам. При этом за нулевую гипотезу примем $H_0: k_i \notin G$.

На основании полученных значений TP и TN строится кривая по показателям чувствительности и специфичности, где чувствительность есть доля истинно положительных случаев:

$$Se = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100 \%,$$

а специфичность – доля истинно отрицательных случаев, которые были правильно идентифицированы моделью:

$$Sp = \frac{TN}{TN + FP} \cdot 100 \%.$$

Модель с высокой чувствительностью часто дает истинный результат при наличии положительного исхода (обнаруживает аномалии). Наоборот, модель с высокой специфичностью чаще дает истинный результат при наличии отрицательного исхода (верно классифицирует нормальные инциденты).

Для апробации предложенного подхода сформируем выборку (табл. 3), содержащую паттерны из набора данных KDD Cup'99.

Таблица 2

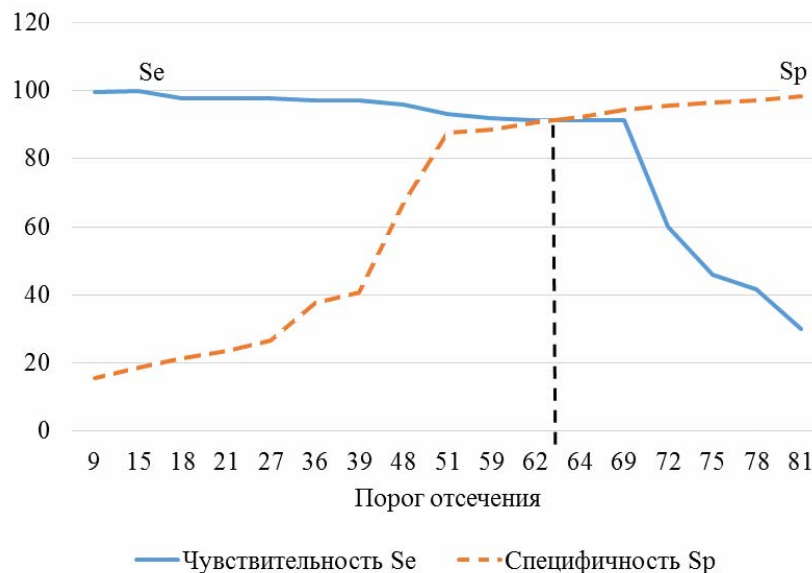
Таблица сопряженности

Модель	Фактически	
	Положительно (аномальный инцидент)	Отрицательно (нормальный инцидент)
Положительно (аномальный инцидент)	TP (true-positive, истинно положительные случаи)	FP (false-positive, ложноположительные случаи) – ошибка II рода
Отрицательно (нормальный инцидент)	FN (false-negative, ложноотрицательные примеры) – ошибка I рода	TN (true-negative, истинно отрицательные случаи)

Таблица 3

Тестовое множество паттернов

Название выборки	Состав	Примечание
ds_1000inc	500 – «teardrop» 500 – «neptune» 1800 – «neptune»	Содержит 1800 прецедентов «neptune». Инциденты представлены паттернами «teardrop» и «neptune». Все паттерны выбраны случайным образом
Всего		2800

Рис. 3. Точка баланса между Se и Sp

Для каждого значения p_{lim} , изменяемого с некоторым шагом, на тестовой выборке рассчитываются значения чувствительности и специфичности (рис. 3).

Для определения оптимального порога отсечения нужно задать критерий его определения. Критериями выбора порога отсечения могут выступать требования:

- минимальной величины чувствительности (специфичности) модели. Например, нужно обеспечить чувствительность классификатора не менее 80 %. В этом случае оптимальным порогом будет максимальная специфичность (чувствительность), которая достигается при 80 % (или значение, близкое к нему «справа» из-за дискретности ряда) чувствительности (специфичности);

- максимальной суммарной чувствительности и специфичности модели;

- баланса между чувствительностью и специфичностью.

Таким образом, по рассчитанным значениям чувствительности и специфичности для диапазона значений p_{lim} и фиксированном d_{lim} находится то значение p_{lim} , для которого выполняется необходимый критерий выбора порога отсечения.

Проведем классификацию новой выборки (табл. 4), используя параметры алгоритма, полученные в результате ROC-анализа.

В качестве критерия выбора порога отсечения воспользуемся требованием баланса $\min|Se - Sp|$, так как в силу специфики решаемой задачи необходимо учитывать ошибки как 1-го, так и 2-го рода. Примем $d_{lim} = 0,7$ и $p_{lim} = 63$. В табл. 5 представлены результаты решения задачи классификации.

Таблица 4

Тестовое множество паттернов

Название выборки	Состав	Примечание
ds_300inc	100 – «teardrop» 100 – «warezclient» 100 – «neptune» 1800 – «neptune»	Выборка содержит 1800 прецедентов класса «neptune». Инциденты представлены 200 аномалиями классов «teardrop» и «warezclient» и 100 нормальными паттернами класса «neptune». Все паттерны выбраны случайным образом
Всего	2100	

Таблица 5

Результаты классификации тестовой выборки

Модель	Фактически	
	Аномальный	Нормальный
Аномальный	95 % (191 шт.)	8 % (8 шт.)
Нормальный	5 % (9 шт.)	92 % (92 шт.)

Заключение. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что применение прецедентного анализа позволяет усовершенствовать процесс управления инцидентами информационной безопасности при идентификации стратегии реагирования, сделать возможной процедуру автоматического выполнения стратегии реагирования для тех инцидентов, которые по результатам решения задачи классификации были отнесены к классу нормальных, и акцентировать внимание специалистов по защите информации на инцидентах, классифицированных как аномальные. Применение статистического и ROC-анализа позволяет установить оптимальные значения предельных параметров алгоритма прецедентного анализа. Зависимость порога отсека от показателей S_p и S_e предоставляет эксперту возможность принятия допустимой точности классификации с учетом критичности ошибок I и II рода.

Благодарности. Работа поддержана грантом президента молодым кандидатам наук, договор № 14.124.13.473-МК от 04.02.2013 г.

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the President of the young PhD, contract № 14.124.13.473-МК on 04/02/2013.

Библиографические ссылки

- ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-1:2005. Информационная технология. Управление услугами. Ч. 1. Сертификация.
- ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-2:2005. Информационная технология. Управление услугами. Ч. 2. Практическое руководство.
- Шалыпин А. А., Жуков В. Г. Алгоритм прецедентного анализа инцидентов информационной безопасности // Информационная безопасность – 2013 : материалы XIII Междунар. науч. конф. ЮФУ. Таганрог, 2013. Ч. 1. С. 96–104.
- Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Новости искусственного интеллекта. 2006. Вып. 3. С. 39–62.

5. Концепция построения прецедентной экспертной системы / А. Ф. Берман [и др.] // материалы XII Междунар. науч. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Владимир, 2003. Ч. 2. С. 110–111.

6. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В. Н. Вагин [и др.] ; под ред. В. Н. Вагина, Д. А. Поспелова. 2-е изд. М. : Физматлит, 2008. 704 с.

7. Варшавский П. Р., Еремеев А. П. Поиск решения на основе структурной аналогии для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. Вып. 1. С. 97–109.

8. Яхтеева Г. Э., Ясинская О. В. Применение методологии прецедентных моделей в системе риск-менеджмента, направленного на раннюю диагностику компьютерного нападения // Вестник НГУ. Сер. «Информационные технологии». 2012. Вып. 2. С. 106–115.

9. Шалыпин А. А. Применение прецедентного анализа в задаче классификации инцидентов информационной безопасности // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : тезисы VIII Всерос. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. Т. 2. С. 381–382.

10. Шалыпин А. А., Жуков В. Г. О прецедентном анализе инцидентов информационной безопасности // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. Ч. 2. С. 213–214.

11. Шалыпин А. А. О настройке параметров алгоритма прецедентного анализа инцидентов информационной безопасности // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 2. С. 166–168.

12. Шалыпин А. А., Жуков В. Г. Прецедентный анализ инцидентов информационной безопасности // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 19–24.

13. Соколов М. М. Исследование влияния функций нахождения расстояния на эффективность работы системы прецедентного обнаружения и анализа инцидентов информационной безопасности // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. /

Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. Ч. 2. С. 317–319.

14. Файнзильберг Л. С., Жук Т. Н. Гарантированная оценка эффективности диагностических тестов на основе усиленного ROC-анализа // Управляющие системы и машины. 2009. Вып. 5. С. 3.

15. Богомолов А. В., Кукушкин Ю. А. Математическое обеспечение метаанализа результатов независимых экспериментальных медико-биологических исследований // Информатика и системы управления. 2011. Вып. 4. С. 65–74.

Reference

1. GOST R ISO/MEK 20000-1:2005. *Informatsionnaya tehnologiya. Upravlenie uslugami. Ch. 1. "Spetsifikatsiya"*. [State Standard R ISO/MEK 20000-1:2005. Information technology – Service management. Part 1: Specification]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 33 p.

2. GOST R ISO/MEK 20000-2:2005. *Informatsionnaya tehnologiya. Upravlenie uslugami. Ch. 2. "Prakticheskoe rukovodstvo"*. [State Standard R ISO/MEK 20000-1:2005. Information technology. Service management. Part 2: Code of practice]. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 55 p.

3. Shalyapin A. A., Zhukov V. G. [Algorithm of case-based analysis of information security incidents] *Materialu XIII mezhdunarod. nauch. konf. "Informatsionnaya bezopasnost-2013"* [Proceedings of XIII International. Scientific. Conf. "Information Security-2013"]. Taganrog, 2013, Part 1, P. 96–104 (In Russ.).

4. Varshavskiy P. R., Ereemeev A. P. [Methods of plausible reasoning, based on analogies and precedents for intelligent decision support systems]. *Novosti iskusstvennogo intellekta*. 2006, Vol. 2, P. 39–62 (In Russ.).

5. Berman A. F., Nikolaichuk O. A., Pavlov A. I., Yurin A. U. [The concept of building a case-expert system] *Materialy XII mezhdunarod. nauch. konf. po vyichislitel'noy mehanike i sovremennym prikladnym programnym sistemam* [Proceedings of XII International. Scientific. Conf. "Computational Mechanics and Advanced Applied"]. Vladimir, 2003, Part 2, P. 110–111 (In Russ.).

6. Vagin V. N, Golovina E. U., Zagoryanskay A. A., Fomina M. V. *Dostoverniy i pravdopodobnyi vyvodi v intellektualnykh sistemakh*. [Credible and plausible conclusion in intelligent systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 704 p.

7. Varshavskiy P. R., Ereemeev A. P. [Search for solutions on the basis of structural analogy for intelligent decision support systems]. *Izvestiya RAN. Teoriya I sistemi upravleniya*. 2005, Vol. 1, P. 97–109 (In Russ.).

8. Yahteeva V. G., Yasinskaya O. V. [Application of the methodology of precedent models in the risk management system aimed at early detection of computer attacks]. *Vestnik NGU. Informatsionnie tehnologii*. 2012, Vol. 2, P. 106–115 (In Russ.).

9. Shalyapin A. A. [Application of case analysis for the problem of classification of information security incidents] *Materiali VIII vserossiyskoi nauch-prak. konf. "Aktualnyie problemy aviatsii i kosmonavtiki"*. [Proceedings of VIII All-Russian. Scientific. Conf. "Actual problems of aviation and astronautics"]. Krasnoyarsk, 2012, Part 2, P. 381–382 (In Russ.).

10. Shalyapin A. A., Zhukov V. G. [Case based analysis of information security incidents. *Materialy XII mezhdunarod. nauch. konf. "Reshetnevskie chtenia"* [Proceedings of XVI International. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2012, Part 2, P. 213–214 (In Russ.).

11. Shalyapin A. A. [About setup algorithm analysis of law case incident information security]. *Materialy XVII mezhdunarod. nauch. konf. "Reshetnevskie chtenia"* [Proceedings of XVII International. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, Part 2, P. 166–168 (In Russ.).

12. Shalyapin A. A., Zhukov V. G. [Case based analysis of information security incidents]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2(48), P. 19–24 (In Russ.).

13. Sokolov M. M. [Investigation of the influence functions for finding the distance to the effectiveness of the system of case detection and analysis of information security incidents]. *Materialy XVII mezhdunarod. nauch. konf. "Reshetnevskie chtenia"* [Proceedings of XVII International. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, Part 2, P. 317–319 (In Russ.).

14. Faizilberg L. S., Zhuk T. N. [Guaranteed performance evaluation of diagnostic tests based on enhanced ROC-analysis]. *Upravlyayushie sistemi i mashini*. 2009, Vol. 5, P. 3–11 (In Russ.).

15. Bogomolov A. V., Kukushkin U. A. [Mathematical software meta-analysis of the results of independent experimental biomedical research]. *Informatika I sistemi upravleniya*. 2011, Vol. 4, P. 65–74 (In Russ.).

© Жуков В. Г., Шаляпин А. А.,
Соколов М. М., 2015

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО КОНТАКТА
В ПОДШИПНИКЕ КАЧЕНИЯ**В. А. Иванов¹, Н. В. Еркаев^{2*}¹ Сибирский федеральный университет, Политехнический институт
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26² Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

*E-mail: nerkaev@gmail.com

Рассмотрена задача нестационарного гидродинамического контакта ролика с упругим слоем с учетом прогиба поверхности, а также влияния давления на коэффициент вязкости. Зависимость вязкости от давления задана экспоненциальной функцией. В работе использовался итерационный метод численного решения уравнения Рейнольдса совместно с интегральным уравнением связи прогиба поверхности с давлением в смазочном слое. Показано, что вертикальное перемещение ролика вызывает дополнительное существенное возрастание давления в смазочном слое, пропорциональное вертикальной скорости. Коэффициент линейной зависимости несущей способности от вертикальной скорости назван коэффициентом демпфирования. В результате расчетов получены зависимости несущей способности и коэффициента демпфирования смазочного слоя от величины минимального зазора между роликом и пластиной. С использованием найденных функций изучен переходный процесс установления стационарного режима при резком изменении внешней нагрузки. Найдено характерное время установления и определены временные вариации пиковых значений давления. Исследовано влияние пьезокоэффициента вязкости на максимальные значения давления, достигаемые в процессе установления. Найдено критическое значение пьезокоэффициента, при котором эффект возрастания давления, обусловленный увеличением вязкости, компенсируется влиянием деформации упругой поверхности.

Ключевые слова: нестационарный режим, контактное взаимодействие, смазочный слой.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 580–586**SIMULATION OF NON-STEADY CONTACT IN ROLLING BEARINGS**V. A. Ivanov¹, N. V. Erkaev^{2*}¹ Siberian Federal University, Polytechnic Institute
26, Akademika Kirenskogo St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation² Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: nerkaev@gmail.com

This article deals with the problem of non-steady hydrodynamic contact of a roller with finite size elastic plate. The lubricant viscosity coefficient is assumed to be exponential function of the pressure. For this problem, an iterative numerical method was elaborated to solve the 2-D Reynolds' equation consistently with the integral equation of relationship between the surface deflection and pressure distribution in the lubrication layer. A normal motion of the roller causes additional pressure enhancement in the lubrication layer, which is proportional to the normal velocity. Coefficient of proportionality is called as damping coefficient. Carrying capacity and damping coefficient are determined from numerical solution as functions of minimal distance between the roller and plate. The obtained functions were used for modeling of the roller oscillations due to sudden variations of the external loading. Characteristic relaxation time and temporal variations of the pressure maximum are determined. Dependence of the pressure maximum on a special piezo-coefficient was investigated, which is a parameter of the exponential function approximating relationship between viscosity and pressure. Higher values of the piezo-coefficient yield larger values of the pressure maximum in the lubrication layer during the relaxation period. However, deflection of the body surfaces makes an opposite effect on the pressure. Therefore behavior of the pressure maximum is determined by two opposite factors related to the viscosity piezo-effect and surface deformations. From numerical simulations, a critical value of the piezo-coefficient is found when the influence of the piezo-coefficient is compensated by that of deformation of the elastic plate.

Keyword: transient mode, contact interaction, lubricant layer.

Введение. Расчет упруго-гидродинамического контакта ролика с деформируемой поверхностью является довольно сложной задачей, так как требует совместного решения уравнений гидродинамики в смазочном слое и уравнений упругости в деформируемом теле [1–10]. Эта задача связана с проблемой моделирования подшипников качения, которые широко используются в авиационных и ракетных двигателях. При работе подшипниковых узлов часто возникают вибрации, связанные с резкими изменениями нагрузки. Это особенно заметно в моменты запуска и остановки механизма, а также при воздействии переменной внешней силы. Эти вибрации существенно влияют на работу подшипника, увеличивая его износ и сокращая срок службы. Поэтому моделирование нестационарного режима работы подшипникового узла является важной задачей. Целью данной работы является анализ нестационарных режимов работы роликового подшипника качения в случае переменной внешней нагрузки.

Описание метода расчета. Рассмотрим контактное взаимодействие цилиндрического ролика с движущейся пластиной, покрытой слоем смазочного материала (рис. 1). Так как радиус ролика очень мал по сравнению с радиусом кольца, по которому он катится, то можно приближенно принять внешнее кольцо подшипника плоской пластиной [7].

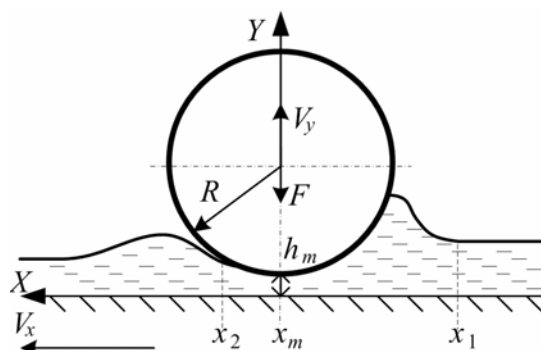


Рис. 1. Схема расположения ролика, пластины и слоя жидкого смазочного материала

Распределение давления в смазочном слое определяется из решения уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \exp(-\alpha P) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 6\mu_0 V \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2}{V} \frac{\partial h}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где P – давление в смазочном слое; V – скорость движения пластины; μ_0 – динамическая вязкость масла при нормальном давлении; $\partial h / \partial t$ – вертикальная скорость ролика; α – пьезокоэффициент давления [11–13]. Ось x ориентирована в направлении движения пластины. Данное решение было подробно рассмотрено ранее в [14], поэтому для сравнения рассмотрим случай контакта бесконечно жесткого ролика с упругой пластиной без учета изменения вязкости в смазочном слое. В этом случае уравнение Рейнольдса имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 6\mu V \left(-\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{2}{V} \frac{\partial h}{\partial t} \right). \quad (2)$$

В предположении, что площадка контакта цилиндра и плоскости мала по сравнению с радиусом кривизны R , имеем следующее выражение для толщины слоя смазочного материала [2]:

$$h = h_m + (x - x_m)^2 / (2R), \quad (3)$$

где h_m – минимальная толщина смазочного слоя; x_m – координата точки минимального зазора.

Граничные условия в рассматриваемом случае имеют следующий вид [1; 2]:

$$P(x_1) = P(x_2) = \frac{dP}{dx}(x_2) = 0, \quad (4)$$

где x_1 и x_2 – входная и выходная границы смазочного слоя.

Для удобства решения задачи вводим безразмерные переменные:

$$\tilde{x} = (x - x_m) / \sqrt{h_m R}, \quad q = Ph_m^{1.5} / (6\mu V \sqrt{R}), \quad (5)$$

$$\tau = tV / \sqrt{Rh_m}, \quad \varepsilon = \frac{V_y}{V} \frac{\sqrt{h_m R}}{h_m},$$

преобразуем исходное уравнение Рейнольдса (2) к более простому виду:

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(H(\tilde{x})^3 \frac{\partial q}{\partial \tilde{x}} \right) = \frac{\partial H(\tilde{x})}{\partial \tilde{x}} + 2\varepsilon, \quad (6)$$

где $H(\tilde{x}) = 1 + \tilde{x}^2 / 2$.

Положения входной и выходной границ будем характеризовать безразмерными параметрами a и c . Значение параметра a зависит от количества смазки. В случае обильной смазки полагаем $a = -\infty$ [2–4].

Интегрируя уравнение (6) и используя нулевое граничное условие (5) для производной функции давления при $x = c$, получаем дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial \tilde{x}} &= \frac{H(\tilde{x}) - H(c)}{H(\tilde{x})^3} - \frac{2\varepsilon(\tilde{x} - c)}{H(\tilde{x})^3} = \\ &= \frac{(\tilde{x}^2 - c^2) / 2}{(1 + \tilde{x}^2 / 2)^3} - \frac{2\varepsilon(\tilde{x} - c)}{(1 + \tilde{x}^2 / 2)^3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение уравнения (7) зависит от безразмерного параметра ε , который связан с нормальной скоростью перемещения ролика. Интегрируя уравнение (7) для различных значений ε , находим распределение давления в смазочном слое, соответствующее различным нормальным скоростям ролика.

По найденному распределению давления определяем безразмерную несущую способность, являющуюся функцией параметра ε :

$$W'(\varepsilon) = \int_a^c q(x, \varepsilon) dx. \quad (8)$$

Расчеты показывают, что зависимость несущей способности от ε очень близка к линейной (рис. 2), и ее можно записать в следующем виде:

$$W' = W'_0 + A\varepsilon, \quad (9)$$

где постоянные коэффициенты W'_0 и A равны 0,401 и 1,125 соответственно.

График зависимости несущей способности W' от нормальной скорости ε в безразмерных единицах представлен на рис. 2.

С учетом соотношений (5) преобразуем выражение (8) к размерному виду:

$$W = W' \frac{6\mu VR}{h_m} \varepsilon + A \frac{6\mu R^{3/2}}{h_m^{3/2}} V_y. \quad (10)$$

Здесь первое слагаемое выражает зависимость стационарной несущей способности от зазора при нулевой нормальной скорости

$$W_0 = W'_0 \frac{6\mu VR}{h_m}, \quad (11)$$

а второе слагаемое учитывает влияние нормальной скорости. Коэффициент перед скоростью будем называть коэффициентом демпфирования λ :

$$\lambda = A \frac{6\mu R^{3/2}}{h_m^{3/2}}. \quad (12)$$

Движение ролика по нормали определяется уравнением динамики

$$m \frac{d^2 h_m}{dt^2} + \lambda(h_m) \frac{dh_m}{dt} - W_0(h_m) = -F, \quad (13)$$

где m – масса ролика; F – внешняя нагрузка.

С учетом зависимостей (11), (12) уравнение (13) принимает следующий вид:

$$m \frac{d^2 h_m}{dt^2} + A \frac{6\mu R^{3/2}}{h_m^{3/2}} \frac{dh_m}{dt} - W'_0 \frac{6\mu VR}{h_m} = -F. \quad (14)$$

Полагая равными нулю производные по времени, определяем равновесное значение зазора:

$$h_0 = \frac{6\mu VR W'_0}{F}.$$

Принимая h_0 в качестве базового зазора, вводим безразмерные переменные:

$$h_m = h' h_0, \quad t = t' \tau, \quad \tau = \frac{A \sqrt{R h_0}}{V W'_0}. \quad (15)$$

Используя нормировки (15), приводим уравнение динамики к безразмерному виду:

$$m' \frac{d^2 h'}{dt'^2} + \frac{1}{h'^{3/2}} \frac{dh'}{dt'} - \frac{1}{h'} = -1, \quad (16)$$

$$m' = \frac{m V^2 (W'_0)^2}{A^2 F R}.$$

Уравнение (16) определяет зависимость зазора от времени в процессе установления стационарного режима. Характерное время переходного процесса характеризуется параметром τ .

Анализ влияния деформаций и зависимости вязкости от давления. Далее переходим к более реалистичной задаче с учетом прогиба поверхности и переменности вязкости, зависящей от давления в смазочном слое. Для расчетов используем следующие числовые параметры: $h_m = 0,00000035$ м, $\mu = 0,024$ Па·с, $\alpha = 0,75 \cdot 10^{-8}$ 1/Па – пьезокоэффициент вязкости, $V = 7$ м/с, $R = 0,005$ м (за основу взят подшипник 32114 серии [15]). Для моделирования примем, что материал пластины имеет следующие механические свойства: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости (сталь), $m = 0,3$ – коэффициент Пуассона.

Решая уравнение (7) при $\varepsilon = 0$, получаем распределение давления в смазочном слое (рис. 3), которое далее используем для определения прогиба упругой поверхности.

При проведении итерационного расчета прогиба поверхности применяем найденную ранее функцию податливости пластины [14]. График этой функции показан на рис. 4. Значения функции нормированы к её максимальному значению: $K_{\max} = 3,267 \cdot 10^{-15}$ Па⁻¹.

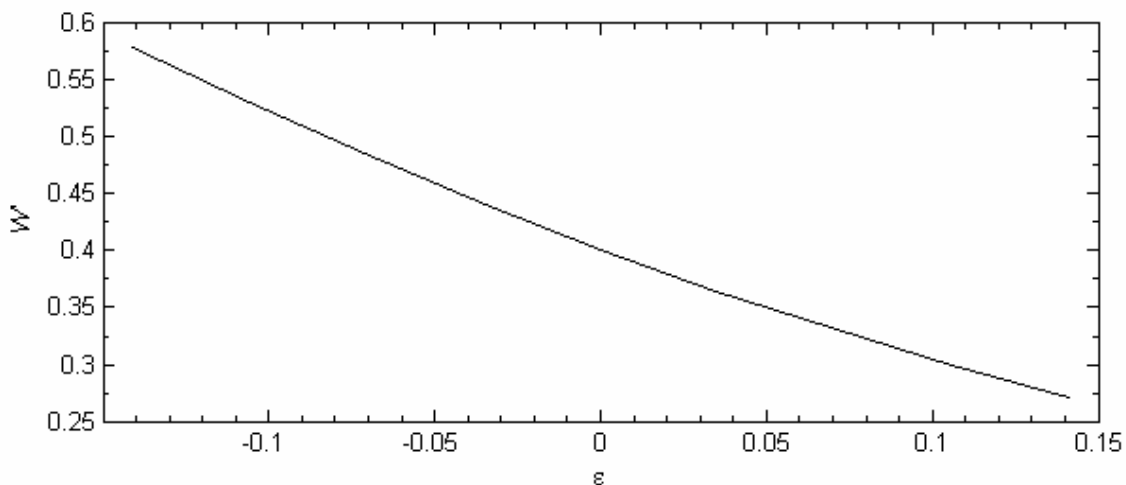


Рис. 2. Зависимость несущей способности от вертикальной скорости в безразмерных единицах

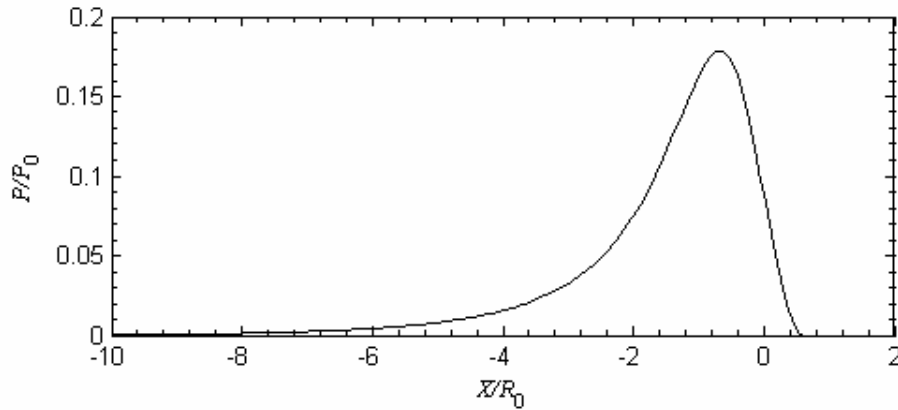


Рис. 3. Распределение давления в смазочном слое

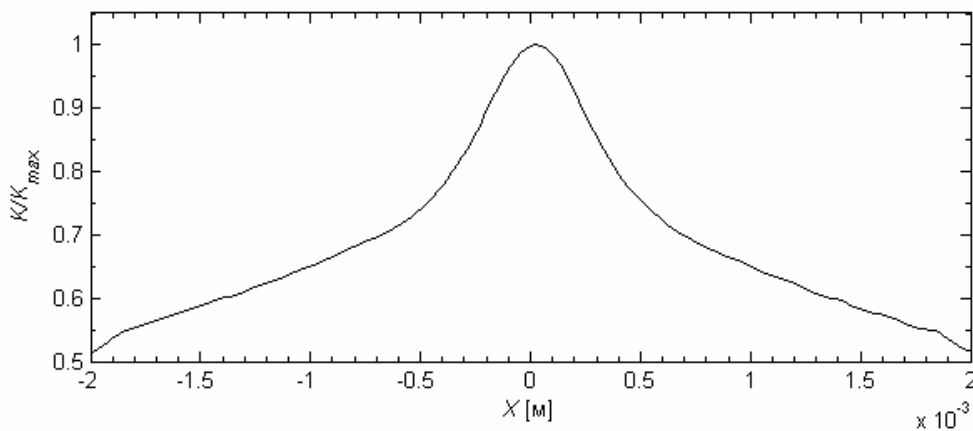


Рис. 4. График функции податливости

Исследуем влияние прогиба поверхности и пьезокоэффициента вязкости на максимум давления в смазочном слое. Данные расчетов, в которых пьезокоэффициент был фиксирован и изменялась лишь величина зазора, приведены в табл. 1. Данные показывают, что пьезокоэффициент вязкости начинает значительно влиять на пик давления только при очень малых зазорах ($h < 3 \cdot 10^{-7}$). Влияние деформации упругой поверхности также становится выраженным лишь при малых зазорах.

Также рассмотрим влияние пьезоэффекта на пик давления в смазочном слое при фиксированном зазоре. Для этого выполним серию расчетов с разными значениями пьезокоэффициента. Согласно результатам расчетов, представленным в табл. 2, при значении $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-8}$ 1/Па влияние пьезокоэффициента на рост пика давления полностью компенсируется прогибом поверхности.

Далее проводим еще одну серию вычислительных экспериментов для нахождения коэффициента демпфирования λ с учетом влияния прогиба поверхности. Для этого рассчитаем величину несущей способности W для различных значений минимального зазора с учетом как положительных, так и отрицательных значений вертикальной скорости. При этом в каждом расчете используем итерационный метод. Зависимость несущей способности W от вертикальной скорости V_y

показана на рис. 5. Зависимость контактной нагрузки от минимального зазора при нулевой вертикальной скорости показана на рис. 6.

Коэффициент демпфирования λ для различных значений минимального зазора определяется как тангенс угла наклона касательной к кривой, выражающей зависимость несущей способности W от нормальной скорости (рис. 5). Используя рассчитанный для различных значений h_m массив значений λ и применяя сплайновую интерполяцию, определяем функцию $\lambda(h_m)$, показанную на рис. 7. Также на рис. 7 показано изменение коэффициента демпфирования для аналитического решения (без учета деформаций и пьезоэффекта).

Найденные функции демпфирования и несущей способности подставляем в уравнение (13), выполняем численное интегрирование и получаем зависимость зазора от времени, а также из уравнения (7) находим соответствующие распределения давления в смазочном слое в различные моменты времени. На рис. 8 показан график изменения максимума давления с учетом коэффициента демпфирования и прогиба поверхности. На этом же рисунке для сравнения представлен аналогичный график максимума давления, полученный без учета пьезокоэффициента давления и прогиба поверхности. Расчет был выполнен для базового зазора $0,00000035$ м.

Таблица 1

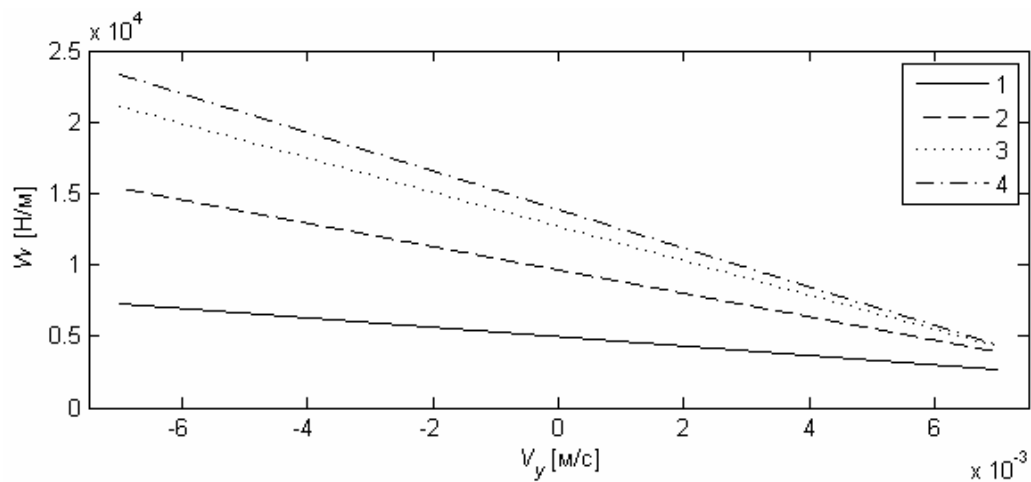
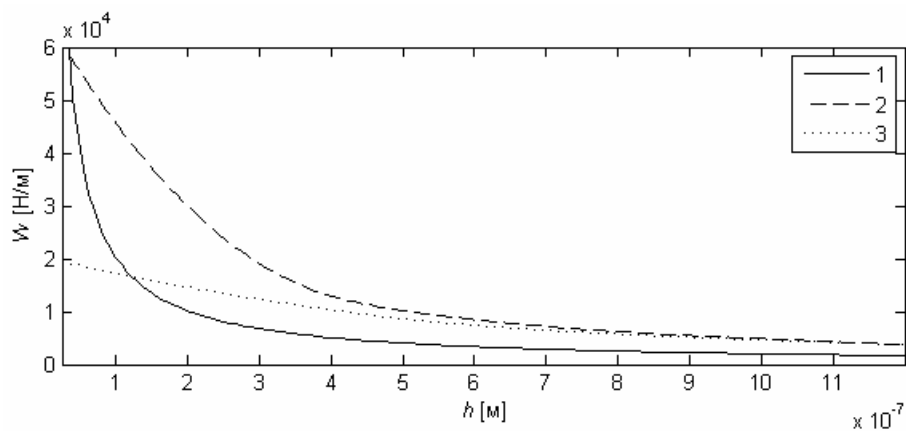
Максимальные давления в разных вариантах расчета ($\alpha = 0,75 \cdot 10^{-8}$ 1/Па, $V_y = 0$)

Минимальный зазор в смазочном слое h_m , м	Максимальные P давление в смазочном слое		
	Без учета пьезоэффекта и прогиба, 10^7 Па	Только с учетом пьезоэффекта, 10^7 Па	С учетом прогиба и пьезоэффекта, 10^7 Па
0,000001	1,26	1,33	1,23
0,0000005	3,59	4,18	3,48
0,00000035	6,13	8,2	5,6
0,00000025	10,02	19,1	8,37

Таблица 2

Влияние пьезокоэффициента на давление в смазочном слое ($h = 0,00000035$ м, $V_y = 0$)

Пьезокоэффициент α , 10^{-8} 1/Па	Максимальные P давление в смазочном слое		
	Без учета пьезоэффекта и прогиба, 10^7 Па	Только с учетом пьезоэффекта, 10^7 Па	С учетом прогиба и пьезоэффекта, 10^7 Па
2,3	6,13	Нет решения	10,2
1,6		24,5	7,54
1,4		13,24	6,89
1,1		10,6	6,18
0,75		8,2	5,6
0,35		6,89	5,08

Рис. 5. Зависимость контактной нагрузки W от вертикальной скорости V_y :
1 – $h = 0,0000001$ м; 2 – $h = 0,00000005$ м; 3 – $h = 0,000000035$ м; 4 – $h = 0,000000025$ мРис. 6. Зависимость контактной нагрузки W от минимального зазора в смазочном слое h_m :
1 – аналитическое решение; 2 – с учетом только пьезоэффекта;
3 – с учетом прогиба поверхности и пьезоэффекта

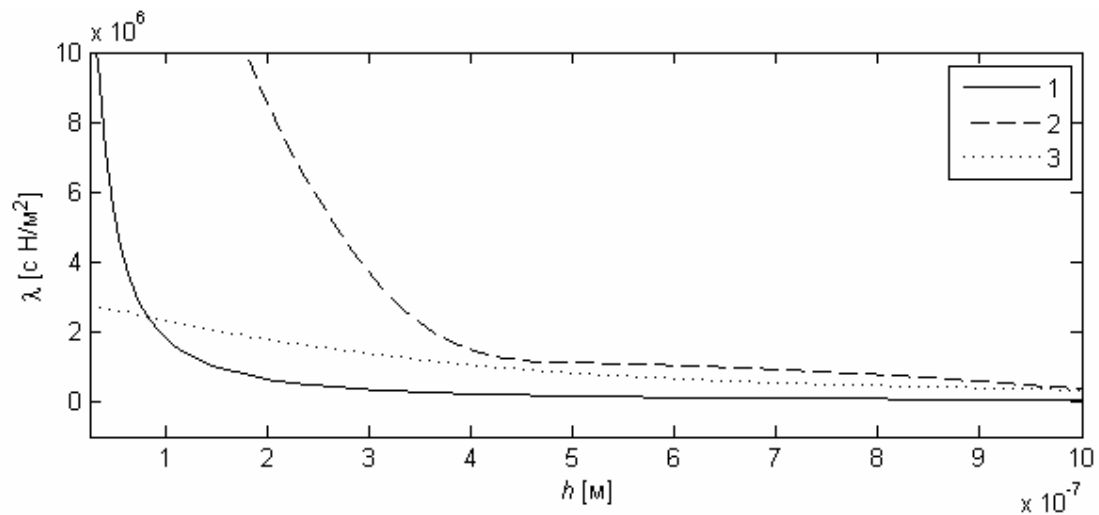


Рис. 7. Зависимость коэффициента демпфирования λ от минимального зазора h_m :
1 – аналитическое решение; 2 – с учетом только пьезоэффекта; 3 – с учетом прогиба поверхности и пьезоэффекта

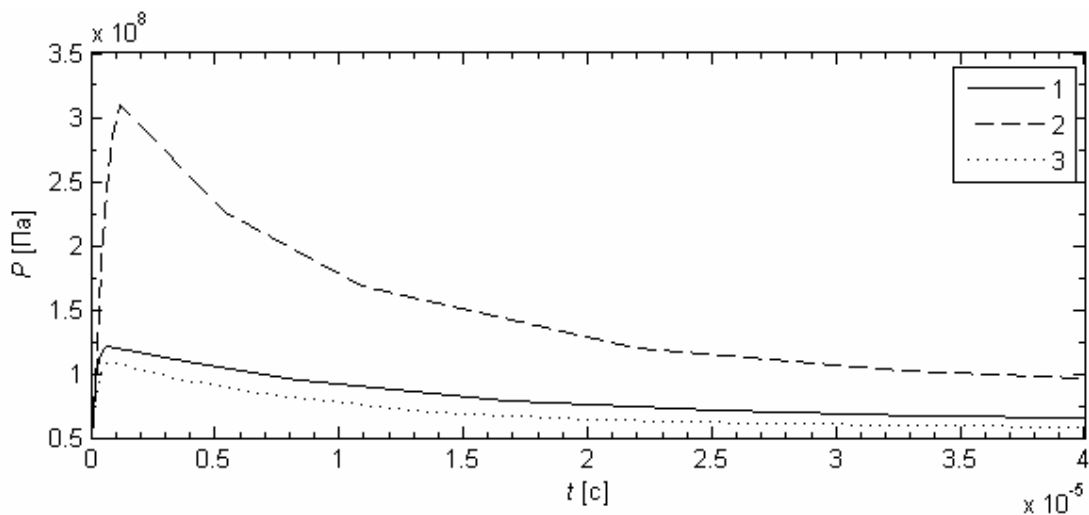


Рис. 8. Изменение пика давления в течение времени:
1 – аналитическое решение; 2 – с учетом только пьезоэффекта;
3 – с учетом прогиба поверхности и пьезоэффекта

Заключение. Решена задача нестационарного упруго-гидродинамического контакта ролика с пластиной с учетом прогиба поверхности, а также влияния давления на коэффициент вязкости. Для этого использовался разработанный ранее итерационный метод численного решения уравнения Рейнольдса совместно с интегральным уравнением связи прогиба поверхности с давлением в смазочном слое. В результате расчетов получены зависимости несущей способности и коэффициента демпфирования смазочного слоя от величины минимального зазора между роликом и пластиной. С использованием найденных функций изучен переходный процесс установления стационарного режима. Исследовано влияние пьезокоэффициента вязкости на пик давления, достигаемый в процессе установления. Найдено критическое значение пьезокоэффициента, при котором эффект возрастания давления, обусловленный увеличением вязкости, компенсируется влиянием деформации упругой поверхности.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 15-05-08879.

Acknowledgements. The work was supported by grant of Russian Foundation for Basic Research 15-05-08879.

Библиографические ссылки

1. Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М. : Машиностроение, 1976. 304 с.
2. Галахов М. А., Усов П. П. Дифференциальные и интегральные уравнения математической модели теории трения. М. : Наука. Физ.-мат. лит., 1990. 280 с.
3. Галахов М. А., Гусятников П. Б., Новиков А. П. Математические модели контактной гидродинамики. М. : Наука, 1985. 294 с.
4. Терентьев В. Ф., Еркаев Н. В., Докшанин С. Г. Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций. Новосибирск : Наука, 2003. 142 с.

5. Venner C. H., Lubrecht A. A. MultiLevel methods in lubrication. Amsterdam : Elsevier, 2000. P. 400.
6. Venner C. H. Multilevel solution of the EHL line and point contact problems: PhD thesis // University of Twente. Enschede, 1991. P. 318.
7. Venner C. H., Lubrecht A. A. Numerical simulation of a transverse ridge in a circular EHL contact under rolling sliding // Trans. ASME J. Tribol. 1994. Pp. 751–761.
8. Anuradha P., Kumar P. EHL line contact central and minimum film thickness equations for lubricants with linear piezoviscous behavior // Tribol. 2011. Int. 44. Pp. 1257–1260.
9. Беспорточный А. И. Асимптотические режимы гидродинамического контакта упругого цилиндра и жесткого полупространства // Труды МФТИ. 2013. Т. 5, № 2. С. 4–12.
10. Беспорточный А. И. Режимы смазки контакта цилиндра с упругим покрытием и жесткого полупространства // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 163. С. 138–143.
11. D'Agostino V., Petrone V., Senatore A. Effects of the lubricant piezo-viscous properties on EHL line and point contact problems // Tribol. Lett. 2013. Int 49. Pp. 385–396. DOI 10.1007/s11249-012-0079-5.
12. Moes H. Lubrication and beyond / Twente Universiti Press. Enschede, 2000. 366 p.
13. Lubrecht A. A. The numerical solution of the elasto-hydrodynamically lubricated line- and point contact problem, using multigrid techniques : PhD Dissertation / Twente University. Netherlands, 1987. 219 p.
14. Иванов В. А., Еркаев Н. В. Итерационный расчет трибоконтакта ролика с пластиной // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 48–54.
15. Нарышкин В. Н., Коросташевский Р. В. Подшипники качения. Справочник-каталог. М. : Машиностроение 1984. 280 с.
3. Galakhov M. A., Gusaynikov P. B., Novikov A. P. *Matematicheskie modeli kontaktной gidrodinamiki* [Mathematical models of contact hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 294 p.
4. Terent'ev V. F., Erkaev N. V., Dokshanin S. G. *Tribonadezhnost' podshipnikovyykh uzlov v prisutstvii modifitsirovannykh smazochnykh kompozitsiy* [Tribodurability of bearing units in a presence of modified lubricant compositions]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003, 142 p.
5. Venner C. H., Lubrecht A. A. MultiLevel methods in lubrication. Amsterdam, Elsevier Publ., 2000, 400 p.
6. Venner C. H. Multilevel solution of the EHL line and point contact problems. PhD thesis, University of Twente. Enschede. 1991, 318 p.
7. Venner C. H., Lubrecht A. A. Numerical simulation of a transverse ridge in a circular EHL contact under rolling sliding. Trans. ASME J. Tribol 1994, P. 751–761.
8. Anuradha P., Kumar P. EHL line contact central and minimum film thickness equations for lubricants with linear piezoviscous behavior. Tribol, 2011, Int. 44, P. 1257–1260.
9. Besportochnyy A. I. [Asymptotic regimes of hydrodynamic contact of an elastic cylinder and a rigid half-space]. *Trudy MFTI*. 2013, Vol. 5, No. 2, P. 4–12 (In Russ.).
10. Besportochnyy A. I. [Regimes of lubrication of the cylinder covered by an elastic layer with a rigid half-space]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*. 2011, No. 163, P. 138–143 (In Russ.).
11. D'Agostino V., Petrone V., Senatore A. Effects of the lubricant piezo-viscous properties on EHL line and point contact problems, Tribol Lett 2013, Int 49, P. 385–396. DOI 10.1007/s11249-012-0079-5.
12. Moes H., Lubrication and beyond. Twente Universiti Press. Enschede. The Netherlands. 2000, 366 p.
13. Lubrecht A. A. The numerical solution of the elasto-hydrodynamically lubricated line- and point contact problem, using multigrid techniques. PhD Dissertation. Twente University. Netherlands. 1987, 219 p.
14. Ivanov V. A., Erkaev N. V. [Iterative calculation of trubo-contact between a roller and plate]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 4(56), P. 48–54 (In Russ.).
15. Naryshkin V. N., Korostashevskiy R. V. *Podshipniki Podshipniki kacheniya. Spravochnik-katalog*. [Rolling bearings. Reference book catalog]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 280 p.

References

**ИЗУЧЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**А. В. Картушинский^{1,2*}, Н. А. Кукоба¹¹ Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79² Институт биофизики СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

* E-mail: kartalvas@rambler.ru

На основе обработки и анализа многолетних спутниковых данных рассматриваются возможности использования расчетных градиентных характеристик для интерпретации космических изображений с целью определения закономерностей формирования горизонтальных неоднородностей физических и биологических компонент природной среды. В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные аппаратными средствами с высоким и низким разрешением AVHRR MCSST, CZCS, SeaWIFS, MIRAS AQUARIUS, MODIS, MSS за различные периоды времени со спутников NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT. Спутниковые данные использовались для вычисления усредненных градиентных полей по температуре воды, солёности и концентрации хлорофилла в океане за различные периоды времени и на разных масштабах сеточной области. Для вычисления меридиональных, широтных и абсолютных градиентов, а также пространственного и временного усреднения применялось авторское программное обеспечение, позволяющее проводить статистический анализ для основных фронтальных зон Мирового океана.

Реализуется методология изучения изменчивости поверхностных градиентных полей водных систем как динамических объектов и рельефа земной поверхности как статического объекта на основе расчета пространственных градиентов соответствующих характеристик с различным временным усреднением. Показаны закономерности пространственно-временной изменчивости поверхностных градиентных полей в океане по температуре воды, солёности и концентрации хлорофилла, их взаимодействие и корреляционная связь. По спутниковым данным рассматривается горизонтальная структура поля мутности и температуры поверхностного слоя малого водного объекта на примере озера Шира (Россия, Хакасия). Протестирована возможность выявления градиентных зон со значительным перепадом высот рельефа поверхности Земли по спутниковым изображениям. В этом случае использовалось программное обеспечение ENVI 4.7, и на языке программирования IDL для выбранного участка проведен расчет абсолютных (по модулю) градиентов высот поверхности. В перспективе необходимо обратить внимание на возможности измерения градиентных показателей поверхности Земли непосредственно из космоса.

Ключевые слова: расчет градиентов, фронтальные зоны океана, взаимодействие физических и биологических полей, неоднородности поверхности, изменчивость.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 587–596**INVESTIGATION OF GRADIENT FIELDS
OF THE EARTH SURFACE BASED ON SATELLITE DATA**A. V. Kartushinsky^{1,2*}, N. A. Kukoba¹¹ Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation² Institute of Biophysics SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

* E-mail: kartalvas@rambler.ru

To determine the horizontal structure of the physical and biological heterogeneities calculated are time-space gradients based on long-term satellite data. AVHRR MCSST, CZCS, SeaWIFS, MIRAS AQUARIUS, MODIS, MSS and NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT picture images were used as input satellite data. Satellite data was used to calculate mean gradient fields of temperature, salinity and chlorophyll concentration in the ocean for different periods of time. The software calculates and averages the horizontal gradients in the ocean for different grids. Calculations are also made to find zonal, meridian, and absolute gradients, pointing to main frontal zones. The gradient fields and their high values give us information about spatial distribution of main frontal zones in the ocean. For study of the gradient field surface in aquatic systems realized is the averaging algorithm for dynamic object. Gradient of land surface shows

changes of relief as steady state object. Space-time variability of gradient fields in the ocean has been received. Here we used satellite data on sea surface temperature, sea surface salinity and chlorophyll concentration. The main stage of research is evaluation of statistical correlation between gradients of temperature and chlorophyll concentration, which suggests a combined effect of physical and biological processes. Horizontal temperature and turbidity fields were considered for small object as Lake Shira (Russia, Khakasia) based on satellite data. Gradient zones of land relief were tested on satellite images. In this case, software ENVI 4.7 and IDL were used to calculate absolute (modulo) gradients surface height. Though idealized, our results suggest the importance of surface gradient parameters for the measuring from space.

Keywords: calculation of gradients, sea surface frontal zones, the interaction of physical and biological fields, surface heterogeneity, variability.

Введение. Интенсивное развитие дистанционных методов зондирования Земли из космоса в совокупности с применением информационных технологий обработки спутниковых данных позволяет создавать устойчивые системы мониторинга экологического состояния природных объектов, в том числе для определения масштабов природных катастроф и аномальных явлений. Спутниковый мониторинг является эффективным методом выявления, оценки и прогноза развития природных процессов и явлений различных пространственных масштабов. Оценка и прогнозирование скорости изменения характеристик природных систем является важной научной задачей в фундаментальном и прикладном значении.

На сегодняшний день существует большое количество методов и подходов для обработки спутниковых изображений [1–5]. Развиваются методы синтеза изображений разного пространственного разрешения [6], методы автоматизированной обработки изображений [7; 8], в том числе синтетический подход к решению задачи распознавания спутниковой информации [9]. Совершенствуются методы классификации природных объектов [10–12], а также статистические методы и модели для выявления степени статичности и динамичности процессов и явлений [13; 14], как, например, орографический эффект влияния на распределение осадков, которые могут изменять рельеф поверхности [15], или определение типов лесов с оценкой их восстановления и повреждения [8]. Интересной с точки зрения оценки статичности и динамичности объекта изучения представляется комбинация моделей и данных спутниковой радарной съемки при изучении морфологической структуры потоков лавы подводного вулкана [14], а также карты вертикального смещения земной поверхности в районах освоения нефтегазовых месторождений [16].

Градиентные показатели и характеристики объектов в алгоритмах обработки изображений используются в основном для выделения контуров элементов и зависят от качества исходных изображений [17]. Градиентные характеристики, которые представляют собой дифференцированные показатели скорости изменения параметров исследуемого объекта (поля), применяются зачастую не в полной мере, особенно для квазистатичных объектов. При этом расчеты динамики исследуемых полей основываются на совмещении или композиции исходных изображений (снимков), сравниваемых в абсолютных количественных показателях и усредненных и интерполированных значениях [6; 7].

Пространственно-временные градиенты параметров состояния поверхности Земли могут показать несколько другую картину динамического проявления процессов как в водных системах, так и на твердой земной поверхности. Таким образом, основной целью данной работы является реализация метода расчета градиентных характеристик земной поверхности по спутниковым данным с использованием разработанных информационно-программных средств и соответствующего программного обеспечения.

Расчет пространственных градиентов характеристик земной поверхности в широтном и меридиональном направлении позволяет выявлять зоны со значительными различиями, которые могут трактоваться как граничные или аномальные. Градиентные поля гидрологических параметров в водных системах позволяют оценивать интенсивность изменчивости динамических процессов [18; 19]. Взаимодействие различных водных масс с отличающимися свойствами формирует гидрологические фронты, которые определяются именно по расчетам соответствующих градиентов [20–22]. В данном случае Мировой океан представляет собой динамическую систему, в которой формируются гидрофизические и гидробиологические структуры, образованные процессами различных пространственных и временных масштабов. Процессы с низкой скоростью динамической активности в пространстве, такие как эрозия почвы, растительный покров, морфология поверхности Земли, по градиентным полям практически не оцениваются.

Материалы и методы. Расчеты градиентных характеристик природных объектов необходимы для выявления зон с различной динамической активностью. Спутниковые измерения в видимом и инфракрасном диапазонах представляют собой изображения с пространственными полями различных характеристик природных объектов поверхности Земли. Основными характеристиками в нашем случае являются отражательная способность поверхности и температура. Методологическая концепция, которая определена необходимостью расчета пространственных градиентов измеренных характеристик поверхности Земли, обоснована возможностью выявления зон с различной динамической активностью физических и биологических полей, а также геологических показателей, таких как рельеф или почвенный покров. В качестве исходных данных в работе используются спутниковые изображения, полученные аппаратными средствами с высоким и низким разрешением AVHRR, MCSST, CZCS, SeaWiFS, MIRAS, AQUARIUS, MODIS, MSS за различные периоды времени со спутников NOAA, TERRA, AQUA, SPOT, LANDSAT (см. таблицу).

Источники исходных спутниковых данных

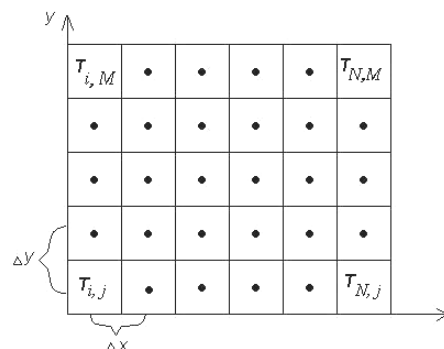
Параметры	Описание	Источник данных
Поверхностная температура океана	NOAA: AVHRR MCSST 1982-2013 (HDF, bit card), 9 км; 18,2 км пространственное разрешение	http://www.ncdc.noaa.gov http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov http://www.podaac.jpl.nasa.gov
Поверхностная температура воды	MODIS: 2002-2013 (HDF, table), 9 км пространственное разрешение	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov
Поверхностная температура и мутность воды	Landsat-8: OLI, TIRS, 2013 (GeoTIF, images), 30 м пространственное разрешение	http://earthexplorer.usgs.gov
Поверхностная температура и мутность воды	SPOT-4: HRVIR, 2011-2013 (TIFF images), 20 м разрешение	www.digitalatlas.ru
Поверхностная соленость океана	AQUARIUS: MCSSS, 2011-2013 (HDF, table), 100 км пространственное разрешение	http://aquarius.nasa.gov/overview-mission.html
Поверхностная концентрация хлорофилла «а»	CZCS: 1982-1986 (HDF, bit card), 18,2 км пространственное разрешение	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS
Поверхностная концентрация хлорофилла «а»	SeaWiFS: 1996-2011 (HDF, table), 9 км пространственное разрешение	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov

Расчеты градиентных характеристик и статистическая обработка спутниковых данных поверхности океана и водных систем проводились с использованием соответствующих разработанных программных средств. Здесь применялись спутниковые данные по температуре поверхности и концентрации хлорофилла, которые сформированы в соответствующей базе данных. Для исследования изменчивости градиентного поля солености океана использовались данные климатического спутника Aquarius/SAC-D.

Для обработки спутниковых данных по территории суши и получения искомым значений градиентных характеристик по данным дистанционного зондирования использовался прикладной пакет ENVI 4.7 с разработанными макросами в среде IDL. В качестве опорной исходной информации в работе использована карта высотной зональности.

Авторские информационно-программные средства обработки спутниковых данных поверхности океана и водных объектов применяются нами для выявления зон с высокими значениями пространственно-временных градиентных показателей и статистической обработки данных.

В общем случае градиент – это характеристика, показывающая направление наискорейшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой. Для случая двумерного пространства под градиентом понимается векторная функция с компонентами $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$, $\frac{\partial \varphi}{\partial y}$, где φ – некоторая скалярная функция соответствующих координат x и y . Исходная расчетная область $F(i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M)$ для вычисления градиента H параметра T соответствующим образом масштабируется в соответствии с пространственным пиксельным разрешением спутникового снимка (исходных данных) и формируется в виде сетки с равными по величине пространственными шагами Δx и Δy (рис. 1).

Рис. 1. Расчетная сеточная область F

В программном обеспечении реализованы алгоритмы вычисления градиентов выбранного параметра T с аппроксимацией первой производной разностью вперед первого порядка для расчета градиентов по широте – формула (1), по меридиану – формула (2) и абсолютного градиента (по модулю) – формула (3):

$$\text{grad}H_n = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta x}, \quad (1)$$

$$\text{grad}H_m = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(T_{i,j+1} - T_{i,j})}{\Delta y}, \quad (2)$$

$$\nabla H_a = \sqrt{\text{grad}H_n^2 + \text{grad}H_m^2}. \quad (3)$$

Для определения изменчивости поверхностных градиентных полей водной поверхности осуществляется усреднение по времени и пространству. Усредняя пиксельные значения градиентов по времени, мы получаем среднемесячные, среднесезонные и среднегодовые значения градиентов:

$$\nabla \bar{H} = \frac{1}{K} \sum_{n,m=1}^K \nabla \bar{H}_{n,m}, \quad (4)$$

где K – количество элементов выборки (снимков).

Усреднение по пространству дает возможность рассчитывать средние градиенты по площади. В этом случае изменяется масштаб расчетной сетки с соответствующим пиксельным увеличением (8, 16, 32, 64, 128), что позволяет оценивать как региональные особенности структуры градиентных полей, так и крупномасштабные и долговременные динамические процессы.

Градиентные поля в океане. Океан является неравновесной системой, и гидродинамические процессы в океане характеризуются свойством нелинейности. Одной из задач в данной области знаний является изучение процессов самоорганизации структуры океана. Океан – это самоорганизующаяся система, которая занимает большую часть территории нашей планеты и оказывает значительное влияние на формирование климата, что обусловлено характером взаимодействия между атмосферой и океаном [23]. Биологические и продукционные процессы в океане значительным образом зависят от гидрофизических и гидродинамических условий, связанных с таким взаимодействием [24]. Спутниковая информация помогает понять, какие пространственные и временные масштабы процессов в океане являются наиболее важными при изменении гидробиологической и гидрофизической структуры океана. Так, несколько факторов, действующих в один момент времени, могут усиливать или ослаблять циркуляцию в отдельных зонах, а также формировать локальные экосистемы [25; 26]. Благодаря инерционности океана формируются зоны взаимодействия различных водных масс, со своей гидрофизической структурой вод существующие в течение длительного времени [21]. Гидрофизические процессы, в свою очередь, существенным образом влияют на гидробиологическую структуру отдельных акваторий океана.

Формирующиеся на поверхности океана температурное поле, поле солёности и поля концентрации хлорофилла являются показателями поверхностной структуры океана. За счет перераспределения горизонтальных потоков, связанных с течениями, на поверхности формируются фронтальные зоны и фронтальные разделы между водными массами со значительно отличающимися свойствами [18; 27]. Кроме того, изменения структуры поверхностного слоя океана существенно связаны с вертикальными движениями вод, в особенности с проявлением такого процесса, как апвеллинг [19; 21]. Для определения измен-

чивости структурной организации поверхностного слоя океана необходима количественная оценка изменений параметров в пространстве.

Абсолютные значения температуры и концентрации хлорофилла на поверхности океана анализируются достаточно давно, и рассчитываются аномалии этих параметров [27], однако изучению пространственно-временной изменчивости расчетных градиентных характеристик уделяется недостаточно внимания. В качестве объекта исследования мы используем фронтальные зоны в океане, т. е. зоны, в которых градиенты основных гидрофизических полей значительно увеличиваются в сравнении со средними значениями градиентов вне пределов данной зоны. Наиболее устойчивы градиентные зоны в тех районах водных систем, где они связаны с устойчивыми системами струйных течений, подъема вод или с определенными формами циркуляционных структур [12; 19; 20].

Поверхностные градиентные поля температуры воды в океане. Переход от средненедельных значений абсолютных значений температуры к расчету среднесезонных, среднесезонных и среднегодовых градиентов температуры поверхности океана позволяет фильтровать мелкомасштабные изменения, что дает возможность оценить крупномасштабную и устойчивую динамику процессов. Так, на рис. 2 показаны градиентные поля температуры и зоны, в которых наблюдаются высокие значения градиентов (0,5–0,9 °С/км), что позволяет характеризовать их как фронтальные зоны. Структура и размеры таких зон позволяют судить о степени интенсификации и изменчивости переноса тепла в верхнем слое океана в горизонтальном направлении для различных периодов времени.

В последнее время в средствах массовой информации муссируются спекуляции на тему «остановки» Гольфстрима в Северной Атлантике и последующего «замерзания» западной части Евразии из-за недостатка переносимых теплых водных масс к берегам Европы. Однако в климатической системе взаимодействия океана и атмосферы, в том числе и в Северной Атлантике, возникают колебательные режимы, которые попеременно ослабляют перенос тепла и массы в океане и приводят к интенсификации переноса тепла и влаги в атмосфере [22; 23]. Спутниковые данные и развитие технологий их обработки играют ключевую роль в изучении физических механизмов взаимодействия «океан–атмосфера».

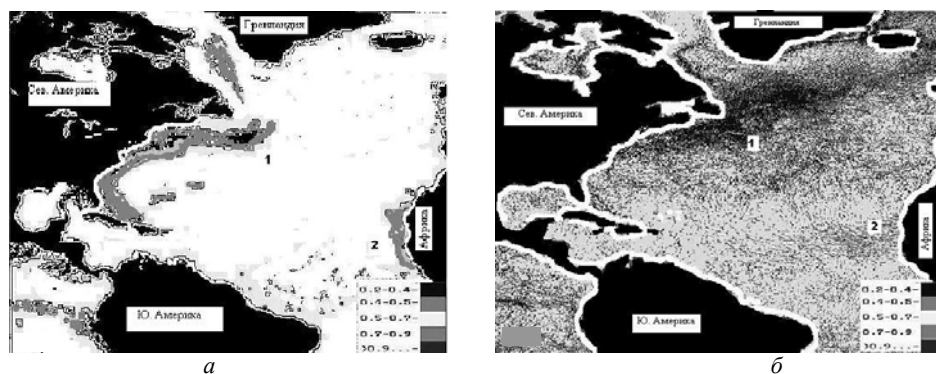


Рис. 2. Поле поверхностных среднесезонных градиентов температуры Северной Атлантики: а) – зима 2000 г.; б) – лето 1983 г.; 1 – фронтальная зона течения Гольфстрим; 2 – фронтальная зона Канарского апвеллинга

Приповерхностные градиентные поля концентрации хлорофилла в океане. Основным биологическим показателем, определяемым на большой площади при помощи космических средств, является концентрация хлорофилла. Структура распределения живых организмов в воде определяется не только зональными климатическими особенностями, но и формированием фронтальных зон. Так как эти зоны образуются из-за взаимодействия различных структур течений, круговоротов и вихрей, такого рода процессы влияют на изменение концентрации биогенных элементов и живых организмов в воде. Оценка их временной изменчивости на основе спутниковой информации дает возможность развивать методы мониторинга водных экосистем [24; 26].

В качестве примера можно представить результаты статистической обработки данных спутниковых наблюдений и расчетов среднегодовых градиентных показателей температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла для зоны действия течения Гольфстрим (коэффициент корреляции 0,6) (рис. 3); для зоны устойчивого подъема вод Канарского апвеллинга (коэффициент корреляции $-0,8$); для зоны действия Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) (коэффициент корреляции $-0,7$). Достаточно высокие коэффициенты кросскорреляции на уровне среднегодового периода усреднения показывают взаимодействие между процессами физической и биологической природы на макроэкосистемном уровне.

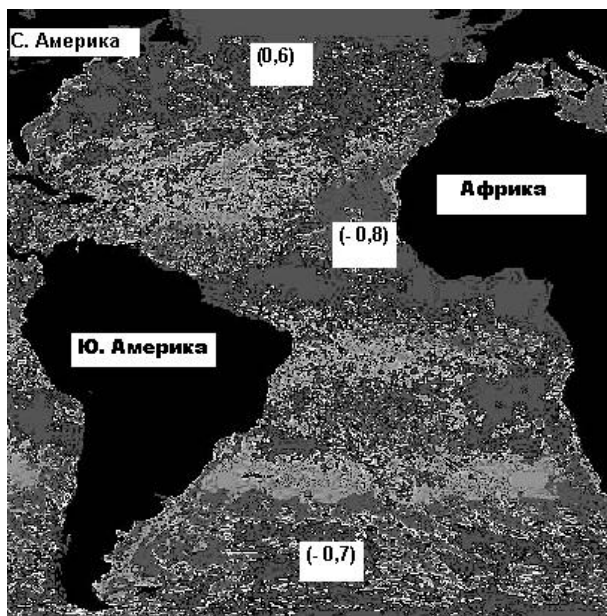


Рис. 3. Спутниковое изображение поверхностного поля концентрации хлорофилла в Атлантическом океане: в квадратах указаны значения коэффициентов корреляции между среднегодовыми градиентами температуры и среднегодовыми градиентами концентрации хлорофилла за период 2003–2009 гг.

Приповерхностные градиентные поля солёности в океане. Солёность океанических вод имеет громадное значение для природы земного шара, так как содействует смягчению климата планеты. Солё-

ность препятствует замерзанию морской воды, тем самым обуславливает в полярных и приполярных областях более продолжительное соприкосновение океанических вод с атмосферой, а это, в свою очередь, увеличивает количество тепла, отдаваемого водами воздуху. Также океаническая солёность усиливает вертикальную циркуляцию вод, потому что плотность воды на поверхности океанов увеличивается не только от понижения ее температуры, но еще и от испарения. Замерзание соленой воды также способствует возникновению вертикальной циркуляции, потому что поверхностная вода при замерзании получает часть солей, не перешедших в лед, становится плотнее и опускается вниз, замещающие же ее более теплые нижние слои отдают свое тепло воздуху [28]. Главную роль в изменении солёности океанических вод играют испарение, количество выпавших осадков и речной сток. Эти факторы зачастую взаимно компенсируют друг друга, но интенсивность их в отдельных районах и в разные сезоны неодинакова, что и создает изменение солёности. Эти процессы действуют только в поверхностном слое океана, поэтому солёность на поверхности океана и отдельных его частей зависит от климатических условий, связанных с широтой.

Принципиально новые возможности для изучения солёности Мирового океана открывают дистанционные методы измерения. В отличие от солёности, изучение температурных полей и полей концентрации хлорофилла по спутниковым данным идет уже длительное время. Отправной точкой измерения солёности считается 2 ноября 2009 г. – дата запуска спутника SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), который стал первым спутниковым аппаратом, предназначенным для измерения степени солёности в разных районах Мирового океана [29]. После этого стала доступной такая возможность, как измерение поверхностной солёности с большим пространственным охватом и повторяемостью, а также картографирование солёности и отслеживание её изменчивости.

Обработка спутниковых данных с целью расчета градиентов поверхностной солёности представляет большой интерес, так как отслеживание изменения во времени наиболее высоких значений градиентов солёности дает принципиальную возможность выявления и анализа динамических процессов, протекающих в Мировом океане.

Для Атлантического океана изменчивость градиентного поля солёности достаточно хорошо привязана к температурным фронтальным зонам (рис. 4). Кроме того, достаточно хорошо проявляется фронтальная зона солёности, сформированная стоком реки Амазонка. В этом районе для исследуемого периода времени максимальное увеличение градиентов наблюдалось для трех месяцев весны 2012 г. (март, апрель, май). В это время сток Амазонки максимально снижал значения солёности в устьевой прибрежной зоне (зона 3 на рис. 4). В последующем сток реки Амазонка уменьшился, и значения солёности вернулись к своим средним локальным значениям, что привело к уменьшению градиентов.

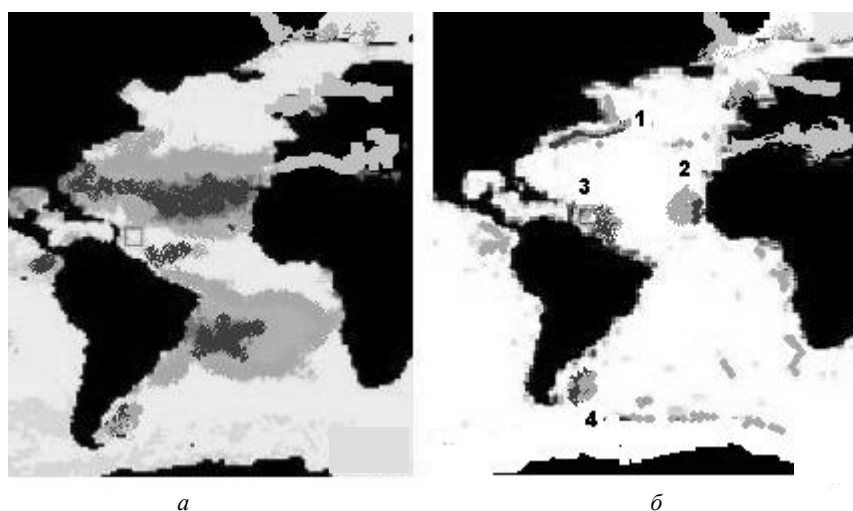


Рис. 4. Атлантический океан, март 2012 г.:

a – распределение солёности в Атлантическом океане (светло-серый цвет: 35–36 ‰, темно-серый цвет: 37–38 ‰); *б* – градиентное поле солёности (серый цвет: $(0,3-0,5) \cdot 10^{-2}$ ‰/км, темно-серый цвет: $(0,5-1,0) \cdot 10^{-2}$ ‰/км). Цифрами обозначены фронтальные зоны: 1 – Гольфстрим; 2 – Канарский апвеллинг; 3 – сток реки Амазонка; 4 – субантарктический фронт Южной Атлантики (зона действия АЦТ)

Поверхностные неоднородности малых водных объектов. Немаловажную роль в понимании закономерностей функционирования водных экосистем играют водные объекты небольших размеров. Однако до недавнего времени спутниковые данные по температуре поверхности и мутности вод имели достаточно низкое пространственное разрешение, что приводило к совершенствованию оптических методов измерений *in situ* и дистанционных методов [30–32]. Появление сканеров высокого разрешения предоставило широкие возможности для изучения динамики поверхностного распределения взвеси и температуры водных систем малых и средних размеров. Мутность в основном вызвана взвешенными наносами в поверхностных водах и характером жизнедеятельности организмов, что позволяет классифицировать типы вод [12; 33], а неоднородное распределение концентрации взвешенных веществ и нормализованный индекс мутности (NDTI) [34] являются важными экологическими параметрами, которые используются при определении качества воды. Низкий коэффициент отражения длины волны λ в зеленой части спектра и высокая отражательная способность в красной части видимого диапазона длин волн для природных вод по формуле (5) дает возможность обрабатывать спутниковые изображения, которые позволяют фиксировать неоднородности поверхностного распределения взвеси по нормализованному индексу мутности [35]:

$$NDTI = \frac{\lambda_{ed} - \lambda_{cle}}{\lambda_{ed} + \lambda_{cle}}. \quad (5)$$

На рис. 5 показаны результаты обработки спутниковых изображений Landsat-8 с маскированием объекта небольшого размера (6×8 км) – озера Шира (Хакасия) при помощи пакета ENVI 4.7 и разработанных подпрограмм с использованием функций языка IDL для выявления полей мутности и температуры

поверхности воды. Проведено сравнение значений температуры и мутности в поверхностном слое воды озера Шира, измеренных на станциях отбора проб *in situ* и полученных со спутника, которое показало достаточно хорошее соответствие. Однако есть некоторое отличие значений, измеренных контактным способом, и дистанционных данных, в особенности по температуре воды, которые могут несколько отличаться в зависимости от времени суток сканирования из космоса.

Пространственное распределение полей температуры и мутности поверхности озера Шира за разные периоды времени имеют определенные отличия, однако достаточно хорошо фиксируются масштабы неоднородностей и границы перепада количественных показателей характеристик, что, в конечном счете, помогает изучать динамику поверхностного слоя водной системы в целом.

Градиенты рельефа земной поверхности. В настоящее время накоплен достаточно большой объем изображений земной поверхности, полученных методами дистанционного зондирования Земли, что позволяет решать задачи по анализу изменения пространственно-временных характеристик земных объектов при помощи градиентного метода. В отличие от поверхности водных систем, которые имеют значительную пространственно-временную изменчивость, поверхность земли и системы суши характеризуются определенной статичностью и имеют низкую динамическую активность границ между экосистемами.

Для отработки алгоритма расчета градиентов поверхности в тестовом режиме используется вырезка изображения высотной зональности части Красноярского края по спутниковым данным (<http://www.computamaps.com/>). Исходное изображение представлено файлом формата tiff размером 1800 на 1800 пикселей и пространственным разрешением 1 км. В качестве

тестовой маски выбрана область размером 100x100 км с неоднородным рельефом местности (рис. 6) и построена трехмерная (3D) модель карты высот выбранного участка (рис. 6, *а*). Выбор данного участка обусловлен спецификой рельефа местности, где наблюдаются изменения урочной поверхности со значительными величинами перепада высот.

При помощи программного продукта ENVI 4.7 на языке программирования IDL для выбранного участка проведен расчет абсолютных (по модулю) градиентов высот поверхности и построена пространственная модель градиентов в виде нормализованных пиков перепадов высоты поверхности (рис. 6, *б*).

Таким образом, определяются склоновые зоны, где наблюдается места наибольших перепадов высот рельефа земной поверхности. Местоположение и величину перепадов высот по спутниковым изображениям визуальнo определить затруднительно, однако градиентный расчет позволяет выявлять такие районы местности. Зоны со значительными градиентами высоты поверхности могут быть использованы для оценки накопления снежного покрова (на склонах горных хребтов), интенсивности эрозии почвы (ветровой или антропогенной), а также для анализа типов растительности, почвы и других параметров с различной степенью изменчивости земной поверхности.

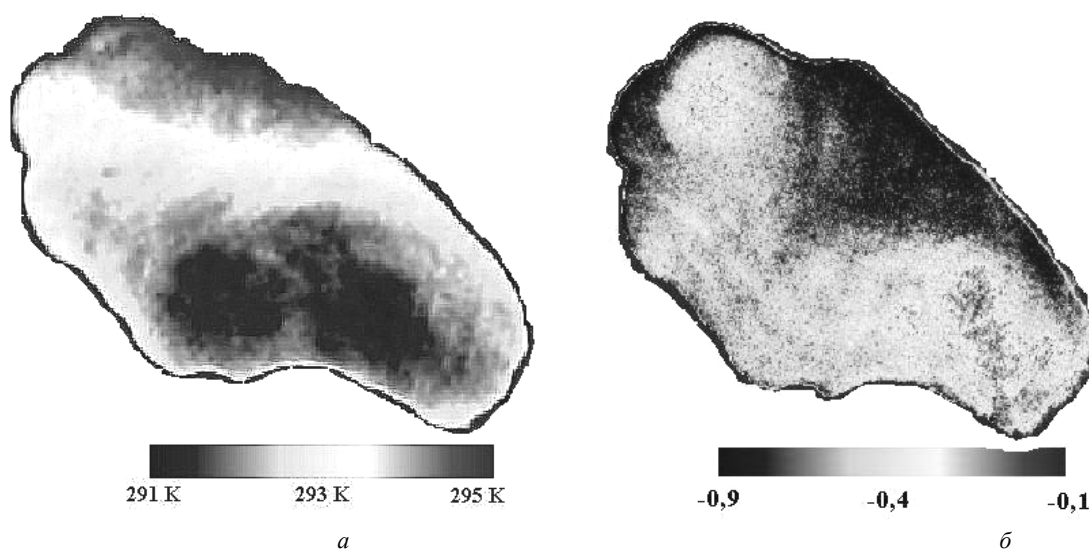


Рис. 5. Пространственное распределение:
а – температуры поверхности воды; *б* – нормализованного индекса мутности озера Шира (для 16.06.2013 г.)

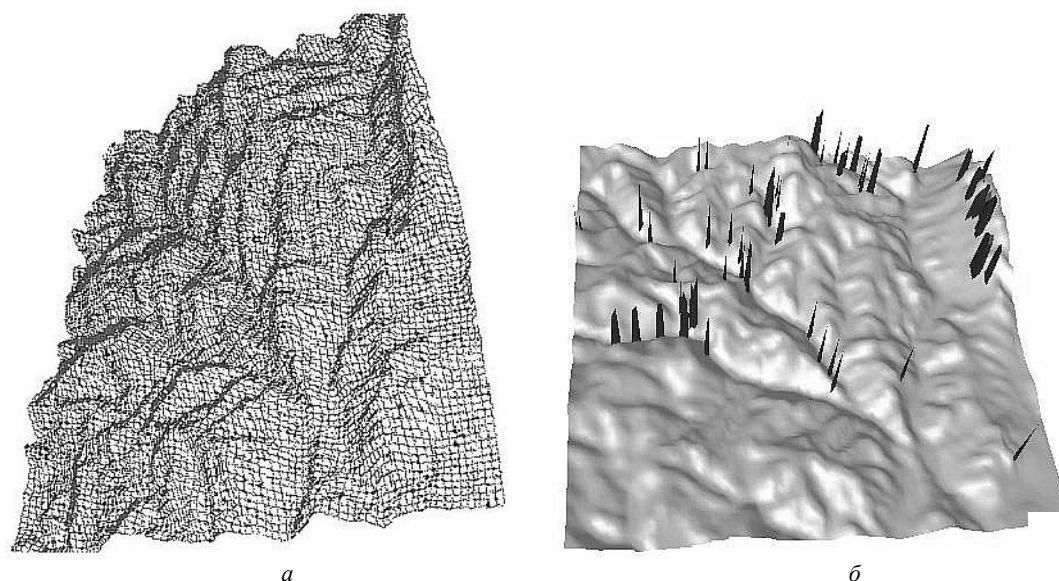


Рис. 6. Трехмерная модель изображения тестового участка Красноярского края:
а – 3D-модель карты высот выбранного участка; *б* – 3D-модель карты высот и пики значительных градиентов рельефа местности

Заключение. Расчеты градиентных характеристик поверхности природных объектов на основе спутниковых данных позволяют выявлять зоны с различной динамической активностью. Анализ распределения величины градиентных полей позволяет выявлять гетерогенные и гомогенные зоны экологических систем, а при соответствующем периоде усреднения получать степень динамичности таких зон. Это, в свою очередь, позволяет изучать процессы формирования структурной организации природных систем и масштабы ее изменчивости, что может применяться при разработке математических прогностических моделей. Статистический анализ градиентных показателей позволяет получать информацию о статистической связи между биологическими и физическими характеристиками природных объектов, а также выявлять глобальные и региональные особенности систем.

Для водных систем изучение структуры градиентных полей температуры воды, солености, концентрации хлорофилла, мутности дает возможность выявлять масштабы граничных (переходных) зон по величине градиента в меридиональном, широтном направлении, а также по модулю. Этот подход, в свою очередь, позволяет оценивать действие факторов физической и биологической природы на формирование экосистемы в целом либо оценивать цикличность действия этих факторов в отдельных частях системы.

Для экосистем суши степень изменчивости поверхностных образований значительно ниже, чем в водных системах, однако градиентный подход может предоставлять дифференцированную картину земной поверхности на основе спутникового изображения.

В качестве основного вывода можно предложить следующее: необходима разработка и установка на космический носитель соответствующей спутниковой аппаратуры для непосредственной регистрации градиентов спектральных характеристик на соответствующих каналах сканирования поверхности Земли.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-05-00853 а.

Acknowledgments. The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-05-00853 а.

Библиографические ссылки

1. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М. : Техносфера, 2010. 560 с.
2. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М. : Техносфера, 2008. 312 с.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2007. 584 с.
4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В. Ф. Кравченко. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 544 с.
5. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие. М. : Логос, 2001. 264 с.
6. Коберниченко В. Г., Тренихин В. А. Методы синтеза изображений на основе данных дистанцион-

ного зондирования Земли различного разрешения // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 4. С. 22–31.

7. PlanetaMonitoring. Программный комплекс обработки спутниковых данных / В. В. Асмус [и др.] // Проблемы информатики. 2013. № 3. С. 85–99.

8. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites / P. Griffiths [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 151. P. 72–88.

9. Андреев С. Н., Фирсов В. Г. Синтез нейросетевых и голографических методов обработки данных дистанционного зондирования Земли // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 9. С. 23–29.

10. Using annual time-series of Landsat images to assess the effects of forest restitution in post-socialist Romania / P. Griffiths [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 118. P. 199–214.

11. Крицук С. Г. Картирование бореальных лесов по спутниковым данным (на примере особо охраняемых природных территорий Ленинградской области) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 255–264.

12. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А. Выявление и распознавание различных типов вод в прибрежной зоне Черного моря и в озерах Крыма на основе анализа гиперспектральных данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 135–147.

13. Ingebrigtsen R., Lindgren F., Steinsland I. Spatial models with explanatory variables in the dependence structure // Spatial Statistics. 2014. Vol. 8. P. 20–38.

14. The emergence and growth of a submarine volcano: The Kameni islands, Santorini (Greece) / P. Nomikou [et al.] // GeoResJ. 2014. Т. 1–2. P. 8–18.

15. Полякова Е. В., Гофаров М. Ю. Морфометрический анализ рельефа острова Вайгач по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 226–234.

16. Преимущество космических радарных систем при выполнении маркшейдерских работ на нефтегазовых месторождениях (на примере Южно-Русского месторождения) / Ю. Б. Баранов [и др.] // Геоматика. 2011. № 1. С. 12–15.

17. Стругайло В. В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2012. № 5. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/411847.html> (дата обращения: 15.04.2015).

18. Kartushinsky A. V. Time-Space Structure and Variability of Surface Temperature frontal Zones in the Ocean // Advances in Space Research. 2000. 25(5). P. 1107–1110.

19. Kartushinsky A. V. The investigation on the dynamics of frontal zones in the ocean based on the numerical modelling, using the AVHRR satellite data // Advances in Space Research. 2004. № 33 (7). P. 1173–1178.

20. Казьмин А. С. Изменчивость крупномасштабных океанических фронтальных зон: анализ глобальной

спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 213–218.

21. Kartushinsky A. V. Dynamic Features of Frontal Zones Structure in the Ocean for Using in the Numerical Models Based on Satellite Data // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2011. № 4(2). P. 208–216.

22. Kartushinsky A. V., Sidorenko A. Y. Analysis of the variability of temperature gradient in the ocean frontal zones based on satellite data // Advances in Space Research. 2013. № 52 (8). P. 1467–1475.

23. Глобальные атмосферные осцилляции в динамике современного климата / В. И. Бышев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 1. С. 62–71.

24. Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Shevyrnogov E. Results of analysis of spatial and temporal long-term stability of quasistationary areas in the global ocean based on multi-satellite measurements (CZCS and SeaWiFS data) // Advances in Space Research. 2004. Т. 33. P. 1184–1188.

25. Krivtsov V., Jago C. F. Some aspects of phytoplankton and ecosystem modelling in freshwater and marine environments: consideration of indirect interactions, and the implications for interpreting past and future overall ecosystem functioning // Ecological Modeling Chapters / ed. W.-J. Zhang. NovaScience, 2011. P. 205–222.

26. Changing states of North Atlantic large marine ecosystems / K. Sherman [et al.] // Environmental Development. 2013. № 7. P. 46–58.

27. Kazmin A. S., Rienecker M. M. Variability and frontogenesis in the large-scale oceanic frontal zones // J. of Geoph. Res. Oceans. 1996. Vol. 101, C1. P. 907–921.

28. Доронин Ю. П. Физика океана. СПб.: ПИТМУ, 2000. 298 с.

29. Европейское космическое агентство, миссия SMOS [Электронный ресурс]. URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS (дата обращения: 08.03.2013).

30. Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям / В. И. Буренков [и др.] // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 716–729.

31. Буренков В. И., Гольдин Ю. А., Кравчишина М. Д. Распределение концентрации взвеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 842–849.

32. Shevyrnogov A. P., Kartushinsky A. V., Vysotskaya G. S. Application of satellite data for investigation of dynamic processes in inland water bodies: Shira Lake (Khakasia, Siberia), a case study // Aquatic Ecology. 2002. Vol. 36, № 2. P. 153–163.

33. Глуховец Д. И., Гольдин Ю. А. Исследование биооптических характеристик вод Карского моря с использованием данных спутниковых и судовых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 346–350.

34. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever

epidemics in Senegal / J. P. Lacaux [et al.] // Remote Sens. Environment. 2007. Vol. 106. P. 66–74.

35. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali) / J. Gardelle [et al.] // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 14. P. 309–324.

References

1. Shovengerdt R. A. *Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy*. [Remote sensing. Models and methods for image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 560 p.

2. Chandra A. M., Gosh S. K. *Distantionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy*. [Remote sensing and geographic information systems]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 312 p.

3. Jahne B. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy*. [Digital image processing]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 584 p.

4. *Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazheniy v radiofizicheskikh prilozheniyakh*. [Digital signal and image processing applications in radiophysics]. Ed. V. F. Kravchenko. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 544 p.

5. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. *Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy*. [Remote sensing from space. Digital image processing]. Moscow, Logos Publ., 2001, 264 p.

6. Kobernichenko V. G., Trenikhin V. A. [Methods of synthesis of images based on remote sensing data of different resolution]. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2007, No. 4, P. 22–31 (In Russ.).

7. Asmus V. V., Buchnev A. A., Krovotyntsev V. A., Pyatkin V. P., Salov G. I. [PlanetaMonitoring The software package of satellite data processing]. *Problemy informatiki*. 2013, No. 3, P. 85–99 (In Russ.).

8. Griffiths P., Kuemmerle T., Baumann M., Radeloff V. C., Abrudan I. V., Lieskovsky J., Munteanu C., Ostapowicz K., Hostert P. Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*. 2014, Vol. 151, P. 72–88.

9. Andreev S. N., Firsov V. G. [Synthesis of neural network and holographic methods of processing remote sensing data]. *Geliogeofizicheskie issledovaniya*. 2014, No. 9, P. 23–29 (In Russ.).

10. Griffiths P., Kuemmerle T., Kennedy R. E., Abrudan I. V., Knorn J., Hostert P. Using annual time-series of Landsat images to assess the effects of forest restitution in post-socialist Romania. *Remote Sensing of Environment*. 2012, Vol. 118. P. 199–214.

11. Kritsuk S. G. [Mapping the boreal forests from satellite data (for example, specially protected areas of the Leningrad region)]. *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012, Vol. 9, No. 4, P. 255–264 (In Russ.).

12. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A. [Identification and recognition of different types of water in the coastal zone of the Black Sea and in the lakes of the Crimea on the basis of the analysis of hyperspectral data].

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014, Vol. 11, No. 1, P. 135–147 (In Russ.).

13. Ingebrigtsen R., Lindgren F., Steinsland I. Spatial models with explanatory variables in the dependence structure. *Spatial Statistics*. 2014, Vol. 8, P. 20–38.

14. Nomikou P., Parks M. M., Papanikolaou D., Pyle D. M., Mather T. A., Carey S., Watts A.B., Paulatto M., Kalnins M. L., Livanos I., Bejelou K., Simou E., Perros I. The emergence and growth of a submarine volcano: The Kameni islands, Santorini (Greece). *GeoResJ*. 2014, Vol. 1–2, P. 8–18.

15. Polyakova E. V., Gofarov M. Yu. [The morphometric analysis of the topography of the island Vagach on remote sensing data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No. 1, P. 226–234 (In Russ.).

16. Baranov Yu. B., Goryaynov M. S., Kantemirov Yu. I., Kiselevskiy E. V., Kulapov S. M., Nokhrin V. A. [Advantages of space radar systems in carrying out mine surveying work in the oil and gas fields (example of Yuzhno Russkoe field)]. *Geomatics*, 2011, No. 1, P. 12–15 (In Russ.).

17. Strugaylo V. V. [Review of methods of filtering and segmentation of digital images]. *Nauka i obrazovanie*. 2012, No. 5. (In Russ.) Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/411847.html> (accessed 15.04.2015).

18. Kartushinsky A. V., Time-Space Structure and Variability of Surface Temperature frontal Zones in the Ocean. *Advances in Space Research*. 2000, No. 25(5), P. 1107–1110.

19. Kartushinsky A. V. The investigation on the dynamics of frontal zones in the ocean based on the numerical modelling, using the AVHRR satellite data. *Advances in Space Research*. 2004, No. 33 (7), P. 1173–1178.

20. Kaz'min A. S. [The variability of large-scale oceanic frontal zones: a global analysis of satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012, Vol. 9, No. 1, P. 213–218 (In Russ.).

21. Kartushinsky A. V. Dynamic Features of Frontal Zones Structure in the Ocean for Using in the Numerical Models Based on Satellite Data. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2011, No. 4 (2), P. 208–216.

22. Kartushinsky A. V., Sidorenko, A. Y. Analysis of the variability of temperature gradient in the ocean frontal zones based on satellite data. *Advances in Space Research*. 2013, No. 52 (8), p. 1467–1475.

23. Byshev V. I., Neyman V. G., Romanov Yu. A., Serykh I. V. [Global atmospheric oscillations in the dynamics of the current climate] *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No. 1, P. 62–71 (In Russ.).

24. Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Shevyrnogov E. Results of analysis of spatial and temporal long-term sta-

bility of quasistationary areas in the global ocean based on multi-satellite measurements (CZCS and SeaWiFS data). *Advances in Space Research*. 2004, Vol. 33, P. 1184–1188.

25. Krivtsov V., Jago C. F. Some aspects of phytoplankton and ecosystem modelling in freshwater and marine environments: consideration of indirect interactions, and the implications for interpreting past and future overall ecosystem functioning. In: *Ecological Modeling Chapters* (ed. W.-J. Zhang). NovaScience. 2011, P. 205–222.

26. Sherman K., Belkin I., Friedland K.D., O'Reilly J. Changing states of North Atlantic large marine ecosystems. *Environmental Development*. 2013, No. 7, P. 46–58.

27. Kazmin A. S., Rienecker M. M. Variability and frontogenesis in the large-scale oceanic frontal zones. *Journal of Geoph. Res.: Oceans*. 1996, Vol. 101, C1, P. 907–921.

28. Doronin Yu. P. *Fizika okeana* [Ocean physics]. St. Petersburg, RSHU Publ., 2000, 298 p. (In Russ.).

29. European space agency. SMOS. Available at: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS (accessed 08.03.2013).

30. Burenkov V. I., Gol'din Yu. A., Artem'ev V. A., Sheberstov S. V. [The optical characteristics of the waters of the Kara Sea based on ship and satellite observations]. *Oceanology*. 2010, Vol. 50, No. 5, P. 716–729 (In Russ.).

31. Burenkov V. I., Gol'din Yu. A., Kravchishina M. D. [The distribution of the suspended matter concentration in the Kara Sea in September 2007 based on ship and satellite data]. *Oceanology*. 2010, Vol. 50, No. 5, P. 842–849 (In Russ.).

32. Shevyrnogov A. P., Kartushinsky A. V., Vysotskaya G. S. Application of satellite data for investigation of dynamic processes in inland water bodies: Shira Lake (Khakasia, Siberia), a case study. *Aquatic Ecology*. 2002, Vol. 36, No. 2, P. 153–163.

33. Glukhovets D. I., Gol'din Yu. A. [A study of the bio-optical properties of the Kara Sea using satellite data and shipboard measurements]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014, Vol. 11, No. 4, P. 346–350 (In Russ.).

34. Lacaux J. P., Tourre Y. M., Vignolles C., Ndione J. A., Lafaye M. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environment*. 2007, Vol. 106, P. 66–74.

35. Gardelle J., Hiernaux P., Kergoat L., Grippa M. Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 2010, Vol. 14, P. 309–324.

A NEW FAST FACE DETECTION TECHNIQUE

Mamdouh M. Gomaa

Astrakhan State University
20a, Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation
E-mail: doha_gomaa@yahoo.com

The problem of human face detection in a natural or artificial environment has always been among the highest priorities for researchers working in the field of computer vision systems and artificial intelligence. An effective face detection system should provide high percentage of correct detections, and low false detection rate in short time. Viola–Jones method is one of the best algorithms in terms of speed/quality ratio. However, this method in many cases gives a large number of false detections. The color of human skin is one of the features that helps to make face detection. The presence of the color information improves the efficiency of face allocation; narrows the search area and reduces the number of false detections and processing time of the input images.

This paper solved is the problem face area detection, based on two new methods. The first technique uses the image pixel skipping process instead of testing each pixel to label it as skin or non-skin by using RGB color space. Second technique uses YCbCr color space and block approach which divides the image into blocks, the size of each block is 3×3 pixels, then we check the central pixel. If the central pixel satisfies the skin criteria, the whole block will be considered as a skin. Finally, we applied Viola–Jones algorithm to detect faces. The experimental results presented in the paper shows that the proposed algorithms provide high speed detection at low false error rate.

Keywords: RGB color space, face detection, skin detection, YCbCr color space, Viola–Jones method, Block algorithm.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 3. С. 597–603**НОВЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛИЦА**

Мамдух Мохаммед Гомаа

Астраханский государственный университет
Российская Федерация, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а
E-mail: doha_gomaa@yahoo.com

Задача выделения лица человека при естественном или искусственном освещении с последующей идентификацией всегда находилась в ряду самых приоритетных задач для исследователей, работающих в области систем машинного зрения и искусственного интеллекта. Хорошая модель обнаружения должна обеспечивать высокий процент верных обнаружений и низкий – для ложных обнаружений за минимальное время работы. Одним из лучших по соотношению показателей «эффективность распознавания – скорость работы» является метод Виолы–Джонса. Однако в ряде случаев этот метод дает достаточно большое количество ложных обнаружений. Одним из признаков для определения лица может являться цвет человеческой кожи. Наличие информации о цвете потенциально может повысить эффективность процесса выделения лица, так как суживает область поиска лица, а следовательно, уменьшает количество ошибочных позитивных выявлений и время обработки входных изображений.

Решена задача выделения области лица на основе двух новых методов. Первая техника использует пропуск пикселей изображения вместо того, чтобы проверить каждый пиксель, чтобы идентифицировать его как кожу или не кожу при помощи цветового пространства RGB. Вторая техника использует цветовое пространство YCbCr и алгоритм, который мы назвали блочным алгоритмом. Блочный алгоритм означает разделение изображения на блоки (каждый размером 3×3 пикселя) с последующим тестированием центрального пикселя. Если этот пиксель отвечает условиям отнесения к коже, то весь блок пикселей рассматривают как соответствующий участку с кожей. Наконец, для выявления лиц на изображениях мы применили метод Виолы–Джонса. Представленные экспериментальные результаты тестирования предложенного алгоритма показывают, что данный алгоритм обеспечивает высокую скорость работы при низком количестве ошибок первого и второго рода.

Ключевые слова: цветовое пространство RGB, обнаружение лиц, обнаружение кожи, цветовое пространство YCbCr, Метод Виолы–Джонса, блочный алгоритм.

1. Introduction

Image is one of the main parts of human life because one image is considered more effective than thousands of words. Face detection is an extremely important step in computer vision and biometric systems such as human-computer interaction (HCI), face image database management and it is the first stage in face recognition [1].

Face detection is described as finding the faces in an original image and locating their position or if there are not any faces in the image, the algorithm does not detect anything. It is difficult because although similarity exists between faces, they can vary considerably in terms of facial expression, skin color, and age. Also, images are changing with different in resolution, contrast and lighting and this task becomes more difficult when faces are close to other objects like beards, mustaches, and glasses etc. In [2; 3], we can found a survey of face detection algorithms.

Generally the process of face detection can be divided into two stages: in the first stage, the image is scanned to find the region (features) that can be identified as face, skin color is using in this step because it is the most common among all, the second stage is localization the position of this faces.

The challenges of face detection are [4]: 1) presence or absence structural components: facial features such as mustaches and beards can be present or absent from a face; 2) lighting effects from external conditions such as shadows; 3) pose; 4) facial expression; 5) orientation; 6) occlusions.

Color provides much robust and fast processing to geometric variations of the face pattern from other features. Skin color is one of the most important features of the human face; because it provides good information for extracting an area of the face and the use of color information can simplify face localization in different environments [5].

Many researchers have proposed various skin detection techniques based on different color space models such as RGB, normalized RGB [6], HSV [7], YCbCr [8] and YIQ [9], a survey on skin detection algorithms can be found in [10; 11].

We introduce new fast techniques for face detection which can be applied in a real-time system. In the first algorithm, we used skipping method [12] instead of testing each image pixel to label it as skin or non-skin by using RGB color space. Second technique uses YCbCr color space and block approach, which divides an image into blocks, the size of each block is 3×3 pixels, then we check the central pixel. If the central pixel satisfies the skin criteria, the whole block will be considered as a skin. Finally, we applied Viola-Jones algorithm to detect faces. The reason for this process is the high probability that neighbors of the skin color pixels are also skin pixels, especially in adult images and vise versa.

The outline of the paper is as follows: Section 2 describes Viola et al. face detection technique. Section 3 focuses on skin detection. The Proposed hybrid face detection techniques are introduced in section 4. Experimental results used to evaluate the performance of these techniques are described in section 5. Finally, our conclusion and future work are presented.

2. Viola–Jones Method

The method of Viola–Jones [13] is one of the best indicators for the effectiveness of performance detection, it is introduced in 2001. The method is called – “Viola–Jones method” (named two authors). The basis of this method is to scan a sub-window capable of detecting faces across a given input image, so that it is allowing to process images with a high detection rate compared with other methods of face detection. The main principles which are used in the method of Viola–Jones as follows: input image used in the integral representation that allows to calculate quickly the necessary facilities; Haar-like features [14], which used to search of the desired object (face and its features); AdaBoost to select the most suitable characteristics from a huge library of potential features and Cascade classifiers.

The first step is convert original image to integral image, to do that, value of each pixel equal to the entire sum of all pixels values above and to the left of the concerned pixel. This allows for the calculation of the sum of all pixels inside any given rectangle using only four values (fig. 1). The integral image at location x, y inclusive:

$$L(x, y) = \sum_{i \leq x, j \leq y} I(i, j), \quad (1)$$

where $L(x, y)$ is the integral image and $I(i, j)$ is the original image. Cumulative row sum:

$$s(x, y) = s(x, y-1) + I(x, y).$$

Integral image:

$$L(x, y) = L(x, y-1) + s(x, y),$$

$s(x, -1) = 0$, and $L(-1, y) = 0$, the integral image can be computed in one pass over the original image.

Fig. 1, *a* shows the value of the integral image at point (x, y) is the sum of all the pixels above and to the left. Fig. 1, *b* gives the value of the integral image at location 1 is the sum of the pixels in rectangle A. The value at location 2 is A+B, at location 3 is A+C, and at location 4 is A+B+C+D. The sum within D can be computed as $4 + 1 - (2 + 3)$. Example of integral image value in numbers shows in fig. 2.

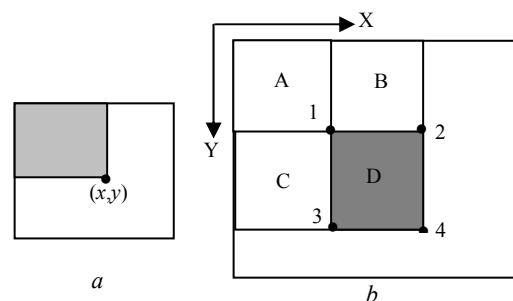


Fig. 1. The value of the integral image

The second step of this technique is AdaBoost. AdaBoost (adaptive boosting) is a machine learning algorithm which can be used for classification. It combines many small weak classifiers to become a strong classifier using only a training set and a weak learning algorithm,

AdaBoost is called adaptive because it uses multiple iterations to generate a single strong learner. The Viola-Jones face detector analyzes a given sub-window using features consisting of two or more rectangles. The different types of features are shown in fig. 3. Each feature results in a single value which is calculated by subtracting the sum of the white rectangle(s) from the sum of the black rectangle(s).

0	1	1	1
1	2	2	3
1	2	1	1
1	3	1	0

input image $I(i,j)$

0	1	2	3
1	4	7	11
2	7	11	16
3	11	16	21

integral image $L(x,y)$

Fig. 2. Example of integral image value in numbers



Fig. 3. The Viola-Jones rectangle feature set

Viola and Jones have empirically found that a detector with a base resolution of 24×24 pixels gives satisfactory results. A weak classifier is mathematically described as:

$$h(x, f, p, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{if } p f(x) < p\theta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

Where x is a 24×24 pixel sub-window, f is the applied feature, p is the polarity and θ is the threshold that decides whether x should be classified as a positive (a face) or a negative (a non-face).

The third major contribution is a method for chaining more complex classifiers in a cascade structure, which achieves increased the performance of the detector while radically reducing computation time by only focusing on promising regions of the image and by focusing on face-like regions of the image.

The main idea is to assume that a simple classifier is often able to detect whether an image contains an object of interest faster. The key insight is that smaller, and therefore more efficient, boosted classifiers can be constructed which reject many of the negative sub-windows while detecting almost all positive instances. Simpler classifiers are used to reject the majority of sub-windows before more complex classifiers are called upon to achieve low false positive rates [13].

The cascade structure contains many classifier stages. In each stage there is a strong classifier trained by using modified AdaBoost on increasingly features until the target detection and false positives rates are met see fig. 4.

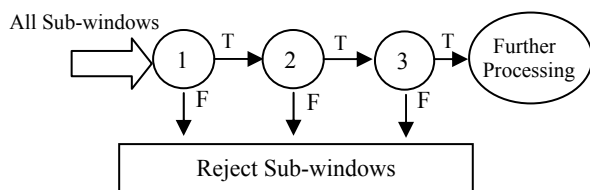


Fig. 4. Schematic depiction of a detection cascade

3. Skin Detection

Skin detection in color images is a very efficient way to locate skin-colored pixels and regions. Skin color is a distinctive feature of human faces. The goal of skin detector is transformed a given pixel into a suitable color space and then classification is to build a decision rule that will distinguish between skin and non-skin pixels. The major problem of such kinds of detector is that it is time-consuming; there are some articles which dealt with speed up the detection process [15; 16].

The method of skin detection is divided into two main categories [17]: pixel-based and region-based skin detection methods. Pixel-based skin detection methods classify each pixel as skin or non-skin individually, independently from its neighbors. On the other hand, region-based skin detection methods try to take the spatial arrangement of skin pixels into account during the detection stage to enhance the methods performance.

RGB color space. RGB is a widely color spaces used for processing and storing of digital image data. RGB cluster is one of the most methods to build a skin classifier through rule or a number of rules. For example, according to Peer et al. [18], a pixel is classified as a skin, if the following constraints are satisfied:

$$\begin{aligned} (R > 95) \&\& (G > 40) \&\& (B > 20) \&\& \\ [\text{Max}\{R, G, B\} - \text{Min}\{R, G, B\} > 15] \&\& \\ (|R - G| > 15) \&\& (R > G) \&\& (R > B). \end{aligned} \quad (3)$$

YCbCr color space. RGB does not provide the correct information about skin color when the luminance is affected [4]; it also fails when there is some more skin region like legs, arms. Results in [19] show that RGB color space is not friendly with face detection based on skin color. YCbCr [20] is a family of color spaces used as a part of the color image pipeline in video and digital photography systems. The Y, Cb, and Cr components refer to Luminance, Chromatic blue and Chromatic red, respectively.

Although there are many color spaces, we choose YCbCr, because its effectiveness in skin detection has been shown previously [21]. YCbCr color space has been defined in response to increasing demands for digital algorithms in handling video information, and has since become a widely used model in a digital video. The transformation from RGB to YCbCr color space is accomplished through the following equations [21]:

$$\begin{aligned} Y &= 16 + 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B; \\ Cb &= 128 - 0.16873 \cdot R - 0.33126 \cdot G + 0.5 \cdot B; \\ Cr &= 128 + 0.5 \cdot R - 0.41868 \cdot G - 0.08131 \cdot B. \end{aligned} \quad (4)$$

There are several skin detection algorithms that utilize YCbCr color space. Chai and Ngan in [22] first proposed YCbCr algorithm, which is include of skin segmentation step followed by a set of processes to reinforce those skin regions that are more likely to belong to the facial regions. They have found that the ranges of Cb and Cr for the skin are:

$$\begin{aligned} 77 &\leq Cb \leq 127, \\ 133 &\leq Cr \leq 173. \end{aligned} \quad (5)$$

Kukharev and Novosielski [23] built skin color model, they were found that the best skin cluster values to produce best results based on 25 face examples of people from different races are given as:

$$Y > 80, 85 < Cb < 135, 135 < Cr < 180. \quad (6)$$

After exhaustive image histogram analysis, Basilio et al. [24] gave values of thresholds for skin detection:

$$80 \leq Cb \leq 120, 133 \leq Cr \leq 173. \quad (7)$$

Through our experimental work, we found that the pixel is classified as a skin if:

$$60 < Cb < 130, 127 < Cr < 170, Y > 75. \quad (8)$$

Zahra et al. face detection method is a hybrid face detection method [25]. It first makes skin detection, then apply the face detection method suggested by Viola and Jones. Experimental result shows that it improves Viola–Jones face accuracy. However, false negative rate in this method is a little bit increased because using skin detection before Viola–Jones method may cause distortion in some faces and the detection algorithm does not detect it and need a long CPU time, so that we worked to improve this disadvantages.

4. Proposed Algorithms

The aim of this work is to improve the efficiency of the human face detection in digital images by improving the efficiency which refers to the following: increasing the percentage of detection rate and decreasing the percentage of false detections with reducing training time. Commonly, used skin detection algorithms can extract skin regions from images accurately and reliably, but they often take a long CPU time to finish the detection process.

In all methods used in skin color detection, all pixels in the image are tested and labeled as skin or non-skin pixel.

The First Proposed Method. In this method, we used the fact that a skin pixel is not by itself rather its neighbors should be skin pixel and the high probability that neighbors of the skin color pixels are also skin pixels, especially in adult images and vise versa. Firstly, we apply skin detection method using RGB color space (equation (3)) but instead of testing each image pixel, we skip a predetermined number of pixels. Then we used Viola–Jones method for detection faces. The steps of the proposed method can be described as follows:

Step 1. Image from database which having default RGB color space is taken.

Step 2. Apply the skin color detection with skipping a number of pixels; in this approach we used skipping 1, 3, 5 and 10 pixels respectively.

Step 3. Apply Viola–Jones Method.

Step 4. Record the detection rate and CPU time of the detection process.

Second Proposed System. In this section, we describe the second proposed system used to detect faces in the image, it's named Block method. The proposed technique combines also skin detection method with Viola–Jones technique, but in skin model, we used YCbCr color space and we divided image to block; the size of each

block is 3×3 pixels, and then applying the skin detection ratios on the central pixel of block (fig. 5). If this pixel satisfies the ratios completely in equation (8), the whole block will be considered as a skin block. The result of skin detection model shows in fig. 6. Fig. 7 shows the steps of face detection algorithms.

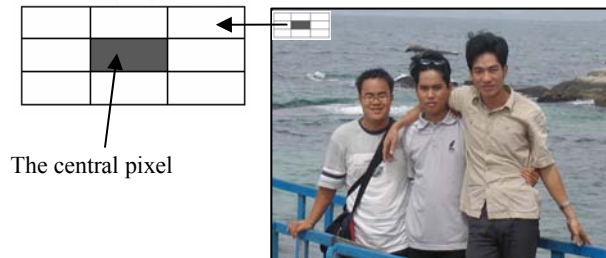


Fig. 5. One Block for skin detection

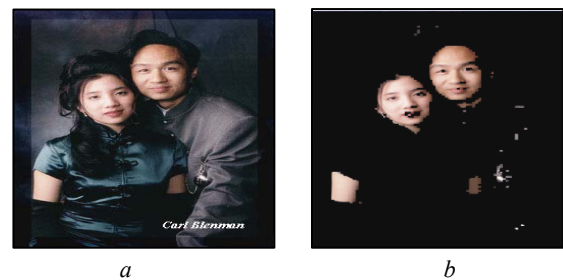


Fig. 6. Original image (a); Proposed skin detection (b)

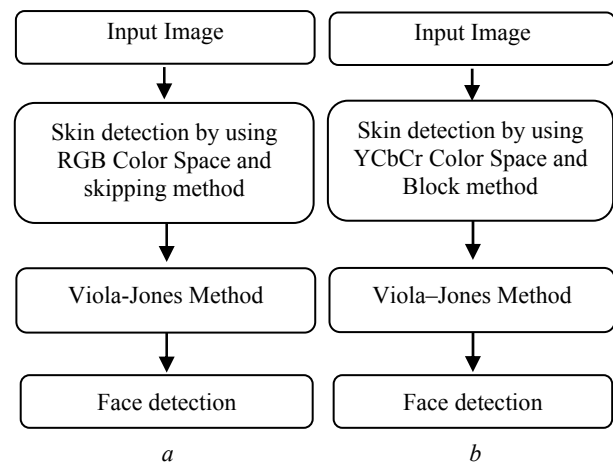


Fig. 7. Steps of face detection algorithms: a – First algorithm; b – Second algorithm

5. Experimental Results

We present a comparison between the two proposed fast face detection techniques (Skipping and Block) described in section 4 with Zahra et al. method. The comparison was in terms of detection rate; false negative rate; false positive rate and CPU time. The system parameters set for experimentation are shown in tab. 1.

For the experiments, we used image database contains 326 faces from 100 images at different imaging conditions and some of these images do not contain faces.

Table 1

System Parameters

System parameters	Values and versions
Simulation software	C# programming language
Processor	Intel (R) Core (TM) i7 – 2630QM (2.00GH)
RAM	4GB
Operating System	Windows 7 (64 bit)

We used to calculate the detection rate (DR), false positive (FP) and false negative (FN) the following equations respectively:

$$\text{Detection Rate} = \frac{\text{number of Detected Faces}}{\text{Total Number of faces}} \cdot 100,$$

$$\begin{aligned} \text{False Positive Rate} &= \\ &= \frac{\text{number of Incorrect Detected Faces}}{\text{Total Number of faces}} \cdot 100, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{False Negative Rate} = \frac{\text{number of Missed Faces}}{\text{Total Number of faces}} \cdot 100.$$

Tab. 2 illustrate the CPU time for all techniques, Zahra et al. method, skipping rates 1, 3, 5 and 10 pixels and Block method. Tab. 3 shows some of the output images obtaining by applying Zahra et al. and the proposed methods. The accuracy rate formula that we used is mentioned in [26; 27]. Equation below shows the accuracy rate:

$$\begin{aligned} \text{Accuracy \%} &= 100 - (\text{False positive Rate \%} + \\ &+ \text{False negative Rate \%}). \end{aligned} \quad (10)$$

As can be seen in tab. 2, 3, using the skipping and block techniques speed up the required CPU time to extract faces regions compared with the Zahra et al. method

and the face detection performance of the proposed methods is better than Zahra et al. method. Tab. 4 gives the Detection Rate, False Negative (FN), False Positive (FP) and Accuracy for each method.

From tab. 4, it is clearly that proposed methods improve the accuracy and Detection Rate of Zahra et al. method. The proposed method could detect approximately 94.5 % when we used skipping 1 pixel; 96 % when skipping 3 pixels; 96.62 % at skipping 5 pixels; at increasing the skipping rate to 10 pixels, the detection rate increased to 97.23 %. But when we applied Block YCbCr, the detection rate becomes 93.87 % of the faces correctly. The detection rate of Zahra et al. method is less than the proposed; the detection rate of this method is 82.8 %. Generally, combining skin detection with Viola & Jones method improves the performance detection rate.

6. Conclusion

This paper presents two new techniques that can be used to greatly improve the Detection Rate and CPU time of face detection basing on skin detection and Viola–Jones algorithm. The first technique uses an image pixel skipping process instead of testing each pixel using RGB color space and after that applying Viola algorithm for detection faces. The second algorithm combines also skin detection and Viola–Jones technique, but in skin model, we divided image to blocks; the size of each block is 3×3 pixels and then applying the skin detection ratios by using YCbCr color space cluster on the centre pixel of block. The experimental results demonstrate that that our new approaches in modeling skin color were able to achieve a good detection success rate. In the future work, we will improve this algorithm by combining it with other face detection algorithm to achieve better performance and further reduce the false detecting rate in dealing with images which has more complex background.

Table 2

Time measured the CPU Time

No of Faces	Image Resolution	Zahra et al. [25]	Skipping 1 pixel	Skipping 3 pixels	Skipping 5 pixels	Skipping 10 pixels	YCbCr Block
2	530×340	1.810	0.676	0.587	0.5610	0.5391	0.5259
4	796×550	02.312	1.1409	0.9616	0.9259	0.9192	0.8662
3	338×427	01.5129	0.54097	0.46823	0.4594	0.4487	0.4402
7	796×550	02.2725	1.2805	1.01371	0.9944	0.9767	0.8471
1	600×754	02.2525	1.04383	0.80757	0.7595	0.74755	0.70968
2	1024×740	03.2153	2.0789	01.6250	1.58655	1.54662	1.29194
0	1024×768	03.5816	1.9958	01.5466	1.48157	1.39828	1.10804
12	796×550	02.4792	01.2208	1.07035	01.0431	1.01663	0.88331
7	640×479	02.0197	01.0021	0.87287	0.83885	0.80418	0.71842
3	796×550	02.2062	01.1844	01.0298	0.98647	0.97374	0.76432
7	796×532	02.5948	01.3263	1.1031	1.0353	01.0165	0.8812
9	796×550	02.3481	1.1792	1.0190	0.99487	0.98292	0.87181

Table 3

Sample face detection results using the test dataset

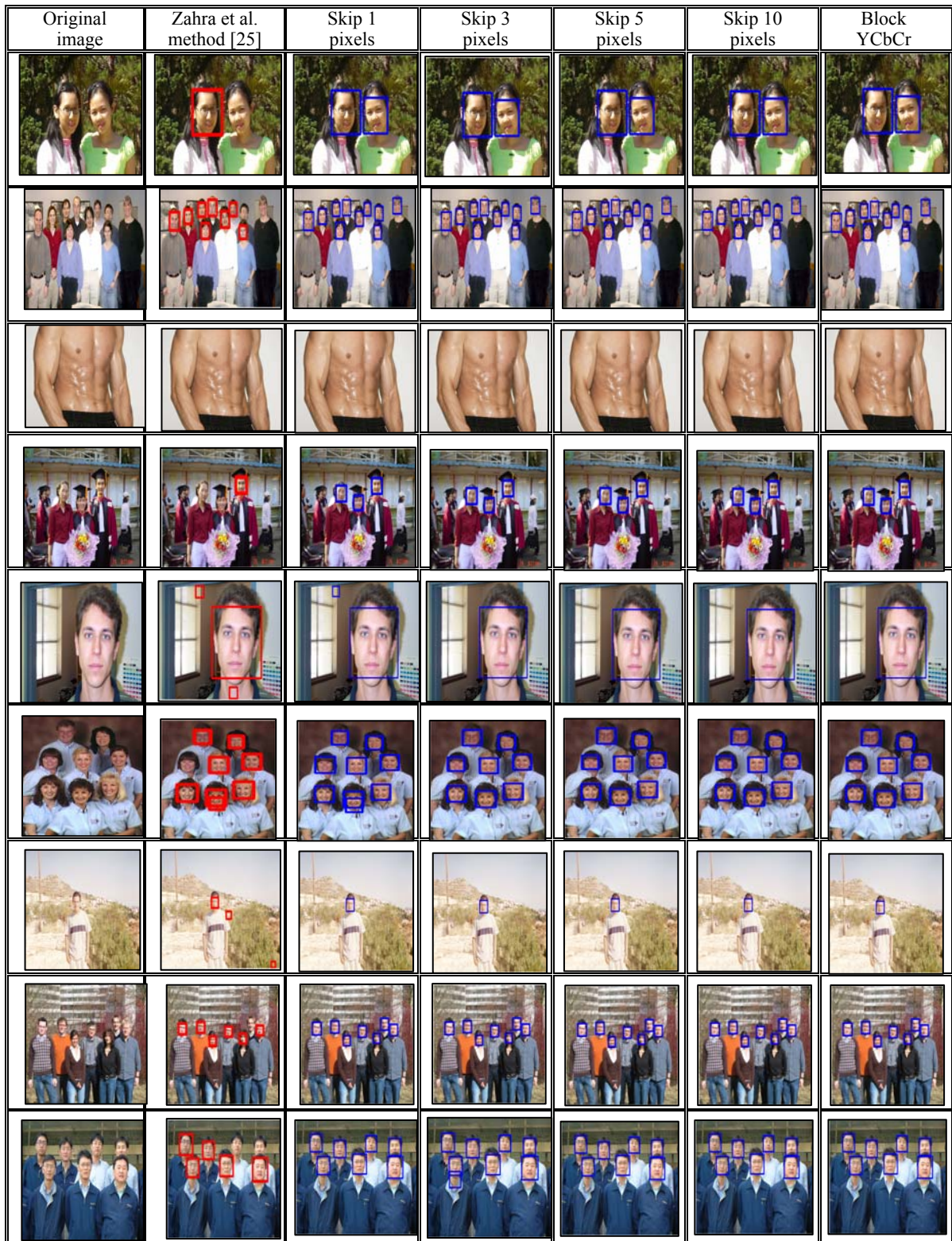


Table 4

Performance evaluation

Method	Detection Rate	FN	FP	Accuracy
Zahra et al. [25]	82.8 %	17.2 %	6.13 %	76.67 %
Skipping 1 pixel	94.5 %	5.5 %	3.37 %	91.13 %
Skipping 3 pixels	96 %	4 %	3.98 %	92.02 %
Skipping 5 pixels	96.62 %	3.38 %	1.53 %	95.09 %
Skipping 10 pixels	97.23 %	2.77 %	1.53 %	95.7 %
Block YCbCr	93.87 %	6.13 %	1.53 %	92.34 %

References

1. Abdul Rahman N., Kit S. RGB-H-CbCr Skin Color Model for Human Face Detection. In *Proceedings of the MMU International Symposium on Information & Communications Technologies*. M2USIC. 2006.
2. Yang M. H., Kriegman D., Ahuja N. Detecting Faces in Images: A Survey. *IEEE Trans. PAMI*. 2002, Vol. 24, No. 1, P. 34–58.
3. Zhang C., Zhang Z. A Survey of Recent Advances in Face Detection. Microsoft Research Technical Report, MSR-TR-2010-66, Jun. 2010.
4. Chitra S., Balakrishnan G. Comparative Study for Two Color Spaces HSCbCr and YCbCr in Skin Color Detection. *Applied Mathematical Sciences*. 2012, Vol. 6.
5. Hsu L., Mottaleb M. A., Jain A. K. Face detection in color images. *IEEE 8th ICIP*, Greece, 2001.
6. Skarbek W., Koschan A. Color image segmentation – a survey. *Tech. rep., Institute for Technical Informatics*. Technical University of Berlin. 1994.
7. Tarek Abd El-Hafeez. A new system for extracting and detecting skin color regions from pdf documents. *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSSE)*. 2010, Vol. 9, No. 2, P. 2838–2846.
8. Poynton C. A. Frequently asked questions about colour. 1995.
9. Duan L., Cui G., Gao W., Zhang H. Adult image detection method base-on skin color model and support vector machine. In *Asian Conference on computer Vision*. Melbourne, Australia, 2002.
10. Kakumanu P., Makrogiannis S., Bourbakis N. a Survey of Skin-Color Modeling and Detection Methods. *Pattern Recognition* 40. 2007, P. 1106–1122.
11. Vezhnevets V., Sazonov V., Andreeva A. A survey on pixel based skin color detection techniques. In *GraphiCon*, Moscow, Russia, Sept. 2003.
12. Tarek M. M. A New Fast Skin Color Detection Technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. P. 456–460.
13. Viola P., Jones M. J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*. 2004, Vol. 57, No. 2, P. 137–154.
14. Rafael C. G., Richard E. W., Steven L. E. Digital Image Processing, 3rd edition. Pearson Education (Singapore) Pvt. Ltd, 2009.
15. Seguier R. A very fast adaptive face detection system. In *Proc. IASTED Conf. on Visualization, Imaging, and Image Processing (VIIP)*. Marbella, Spain, Sep. 2004.
16. Tomaz F., Candeias T., Shahbazkia S. Fast and Accurate Skin Segmentation in Color images. *CRV04*, 2004.
17. Deepak G., Joonwhoan L. A Robust Face Detection Method Based on Skin Color and Edges. *J. Inf. Process Syst.* March 2013, Vol. 9, No. 1.
18. Peer P., Kovac. J., Solina. F. Human Skin Color Clustering for Face Detection. *EUROCON1993*, Ljubljana, Sloveni. 2003, P. 144–148.
19. Sanjay S., Chauhan D. S., Mayank V., Richa S. A Robust Skin Color Based Face Detection Algorithm. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 2003, Vol. 6, No. 4, P. 227–234.
20. Mohammad S. I., Ali Y. Skin Color Segmentation in Fuzzy YCBCR Color Space with the Mamdani Inference. *American Journal of Scientific Research*. July 2001, P. 131–137.
21. Rafael G., Richard W., Steven E. Digital Image Processing using Matlab. Prentice Hall. 2004.
22. Chai D., Ngan K. Face segmentation using skin-color map in videophone applications. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*. 1999, Vol. 9, No. 4, P. 551–564.
23. Kukharev G., Novosielski A. Visitor identification elaborating real time face recognition system. In *Proc. 12th Winter School on Computer Graphics (WSCG)*, Plzen, Czech Republic. Feb. 2004. P. 157–164.
24. Basilio J. A. M., Torres G. A., Pérez G. S., Medina L. K. T., Meana H. M. P. Explicit image detection using YCbCr space color model as skin detection. *Proceedings of the American conference on applied mathematics*. 2011. P. 123–128.
25. Zahra S. T., Rahmita R. W., Udzir. N. B., Kheirkhah E. A. Hybrid Face Detection System using combination of Appearance-based and Feature-based methods. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2009, Vol. 9, No. 5, P. 181–185.
26. Reza A., Eslam A., Babak A. Real-Time Human Face Detection in Noisy Images Based on Skin Color Fusion Model and Eye Detection. *Intelligent Computing, Communication and Devices, Advances in Intelligent Systems and Computing* 309. 2014, Vol. 2, P. 435–447.
27. Singh S. K., Chauhan D. S., Vatsa M., Singh R. A Robust Skin Color Based Face Detection Algorithm. *Tamkang Journal of Science and Engineering*. 2003. Vol. 6, No. 4, P. 227–234.

**О ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ПОСТРОЕНИИ
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОЦЕНОК РЕГРЕССИИ**

Е. С. Мангалова*, О. В. Шестернева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: e.s.mangalova@hotmail.com

Универсальность методов идентификации позволяет применять их как в различных технических областях (в том числе и в ракетно-космической отрасли), так и в медицине, экономике и т. д. В последние годы большое распространение среди методов идентификации получили ансамбли моделей. Идея построения ансамбля состоит в обучении нескольких моделей одного типа с последующим их объединением. Одной из основных задач объединения нескольких моделей одного типа является устранение тех или иных недостатков определенных индивидуальных моделей. Рассматриваются некоторые особенности построения непараметрических оценок Надарая–Ватсона, связанные с наличием разреженных областей пространства входных переменных (областей, содержащих малое количество наблюдений в обучающей выборке), а также с поведением непараметрической оценки Надарая–Ватсона вблизи границ областей пространства входных переменных. Предложен подход к формированию ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона, основанный на принципах последовательного обучения. Формализована процедура построения предложенного ансамбля последовательного обучения. Приводятся некоторые рекомендации по выбору параметров при построении последовательности непараметрических оценок. Проведены численные исследования, в ходе которых было показано, что точность ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона превосходит единственную оценку как в разреженных областях пространства входных переменных, так и в областях с большим количеством наблюдений. Показана высокая точность идентификации вблизи границ пространства входных признаков, а также возможность применения ансамблевого алгоритма для экстраполяции.

Ключевые слова: восстановление регрессии, ансамблевое обучение, непараметрическая оценка Надарая–Ватсона, параметр размытости.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 604–610**ABOUT BOOSTED LEARNING OF NONPARAMETRIC ESTIMATORS**

E. S. Mangalova*, O. V. Shesterneva

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: e.s.mangalova@hotmail.com

Versatility of identification methods allows to apply them in different technical areas (including the aerospace industry), as well as in medicine, economics, etc. In recent years, ensemble learning is becoming one of the most common methods of identification. Ensemble methods train multiple learners and further combine their use. One of the main tasks of combining multiple models with the same type is to eliminate certain drawbacks of individual models. This paper deals with some peculiar properties of the Nadaraya–Watson kernel estimator. These peculiar properties are related with existence of sparse areas in the space of input variables (some regions contain a small number of observations in the training set) and with the behavior of the Nadaraya–Watson kernel estimator near the boundary of the input variables space. The ensemble learning approach proposed by the authors is based on boosted learning of nonparametric estimators. There is a formalized approach to ensemble building with configurable parameters and there are some guidelines for choosing these parameters. The numerical researches shows that proposed boosted ensemble is significantly more accurate than a single Nadaraya–Watson kernel estimator both in case of sparse areas in the space of input variables, and in case of areas with a large number of observations in the training set. Also the numerical research demonstrates high accuracy of proposed boosted ensemble near the boundary of the input variables space and shows the possibility of using boosted ensemble in the extrapolation problem.

Keywords: regression, ensemble learning, Nadaraya–Watson estimator, bandwidth.

Введение. Широкое распространение методов моделирования, идентификации объясняется возможностью их применения для построения моделей явлений, объектов и процессов разной физической природы. Универсальность и эффективность методов идентификации позволяют применять их как для различных технических систем (в том числе и в ракетно-космической отрасли), так и в медицине, экономике и других областях науки и практики.

На сегодняшний день существует широкий спектр методов идентификации: от традиционных методов статистического анализа до современных алгоритмов машинного обучения [1]. В последние годы большую популярность получило построение коллективов моделей (ансамблей) [2–4].

Одной из основных задач объединения нескольких моделей одного типа является устранение тех или иных недостатков определенных моделей. Например, если деревья классификации и регрессии (CaRT) [5] склонны к переобучению, то их коллективы (Random Forest [6], GBM [7; 8]) менее подвержены этому негативному эффекту.

В данной работе предложен подход к формированию ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона [9], позволяющий получать более гладкие и точные оценки в разреженных подобластях пространства входных переменных, чем при построении единственной непараметрической оценки.

Постановка задачи. Формально задачу идентификации можно записать следующим образом [10]. Имеется множество наблюдений:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}.$$

Каждое наблюдение характеризуется набором переменных:

$$g_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m, y_i\},$$

где $x^1, x^2, \dots, x^m$ – независимые переменные, значения которых известны и на основании которых определяется значение зависимой переменной y . Требуется восстановить зависимость между независимыми входными переменными $x^1, x^2, \dots, x^m$ и выходной переменной y . Какая-либо другая априорная информация об исследуемом объекте отсутствует.

При подобных постановках задачи одним из распространенных методов [11–13] восстановления зави-

симости между входом и выходом является непараметрическая оценка регрессии Надарая–Ватсона:

$$\hat{y}(\bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c^j}\right) y_i}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c^j}\right)}, \quad (1)$$

где K – ядерная функция; $\bar{c}$ – вектор параметров размытости.

Однако в ряде случаев данный подход имеет некоторые недостатки. При наличии разреженных областей в пространстве входных переменных (рис. 1) минимальный параметр размытости (рис. 1, а), необходимый для того, чтобы оценка (1) существовала во всех точках исследуемой области пространства входной переменной, настолько велик, что в некоторых точках ядро захватывает большую часть наблюдений (рис. 1, б), что может привести к определенным искажениям оценки.

Другой важный момент связан с уменьшением точности оценки (1) на границах пространства входных переменных [14].

Данные недостатки могут быть устранены с помощью объединения непараметрических оценок Надарая–Ватсона в ансамбль последовательного обучения [15].

Ансамбль непараметрических оценок. Идея построения ансамбля непараметрических оценок состоит в итеративном улучшении некоторой начальной (базовой) оценки регрессии Надарая–Ватсона за счет последовательного добавления непараметрических оценок невязок текущего ансамбля.

Процедура формирования ансамбля показана на рис. 2. Процедура начинается с построения некоторой базовой оценки (1) с большими параметрами размытости. Затем вычисляются невязки между выходом объекта и выходом базовой оценки, по которым строится следующая непараметрическая оценка (1) с меньшими параметрами размытости. Данная оценка добавляется к базовой оценке, так формируется ансамбль первого уровня. Затем вычисляются невязки между выходом объекта и выходом ансамбля первого уровня, и так далее, пока добавление каждой новой оценки в ансамбль приводит к его улучшению.

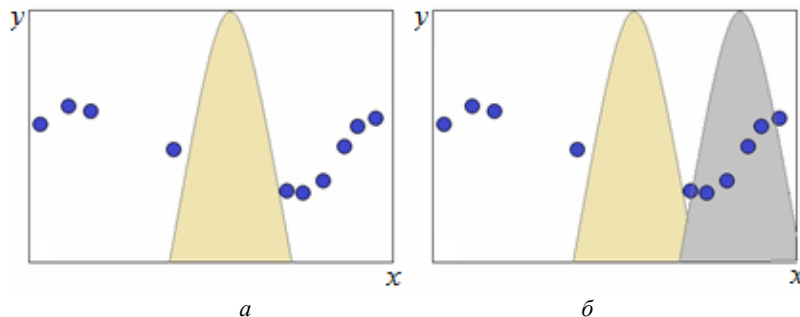


Рис. 1. Ядро минимальной ширины:

а – позволяющее получать некоторое значение оценки (1) в любой точке исследуемой области пространства входной переменной; б – захватывающее более половины наблюдений

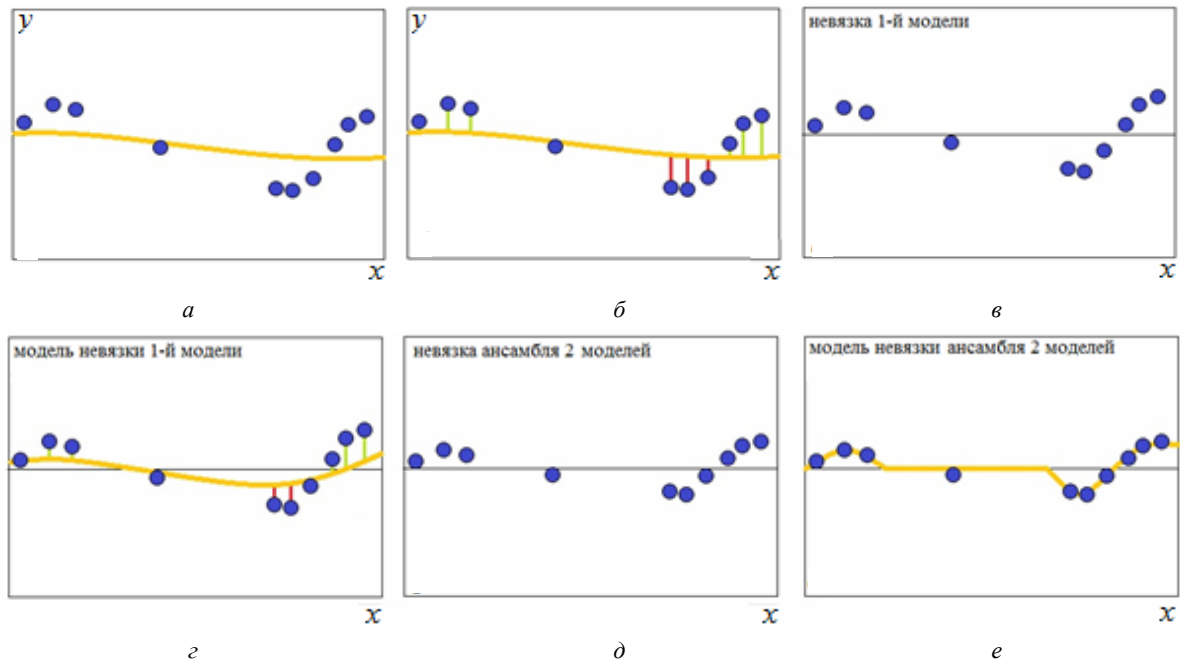


Рис. 2. Процедура формирования ансамбля непараметрических оценок последовательного обучения: *a* – построение базовой оценки с большим параметром размытости; *б* – вычисление невязок между выходами объекта и модели; *в* – формирование выборки, состоящей из невязок; *г* – построение модели невязки с меньшим параметром размытости, вычисление невязки ансамбля первого уровня; *д* – формирование выборки, состоящей из невязок ансамбля первого уровня; *е* – построение модели невязок ансамбля первого уровня с меньшим параметром размытости

На первых итерациях (при больших параметрах размытости) алгоритм восстанавливает зависимость в разреженных областях, при этом оценки в областях с достаточным количеством наблюдений, очевидно, уступают в точности непараметрической оценке, построенной с меньшими параметрами размытости. Начиная с некоторого шага, ядро непараметрической оценки в точках разреженных областей перестает захватывать какие-либо из имеющихся наблюдений, процесс формирования ансамбля для таких областей автоматически прекращается. Одновременно с этим начинается уточнение оценки в областях с достаточным количеством наблюдений. Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет строить максимально точные (из возможных в классе непараметрических оценок Надарая–Ватсона) оценки как в разреженных областях пространства входных переменных, так и в областях, в которых количество наблюдений велико.

Формирование ансамбля непараметрических оценок регрессии. Формирование ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона происходит последовательно. Каждая последующая оценка добавляется в ансамбль с целью улучшить его качество. Данный процесс продолжается до того момента, пока уменьшается значение меры рассогласования L выхо-

да модели (ансамбля) и объекта, вычисленное по валидационной выборке $(\tilde{x}, \tilde{y})$:

$$L(H_q(\tilde{x}), \tilde{y}) < L(H_{q-1}(\tilde{x}), \tilde{y}).$$

В качестве меры рассогласования L в работе использовалась квадратичная ошибка:

$$L(H_q(\tilde{x}), \tilde{y}) = \sum_i (H_q(\tilde{x}_i) - \tilde{y}_i)^2.$$

Ансамблем нулевого уровня $H_0(\bar{x})$ является непараметрическая оценка

$$H_0(\bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_0^j}\right) y_i}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_0^j}\right)},$$

где $\bar{c}_0$ – вектор параметров размытости.

Каждая последующая непараметрическая оценка дополняет текущий ансамбль $H_{q-1}(\bar{x})$, минимизируя невязку между выходом объекта y и выходом текущего ансамбля $H_{q-1}(\bar{x})$:

$$H_q(\bar{x}) = H_{q-1}(\bar{x}) + \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_q^j}\right) (y_i - H_{q-1}(\bar{x}_i))}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_q^j}\right)}, & \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_q^j}\right) > 0, \\ 0, & \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m K\left(\frac{x^j - x_i^j}{c_q^j}\right) = 0, \end{cases} \quad q = 1, 2, \dots, Q.$$

В результате задача построения ансамбля непараметрических оценок сводится к следующей задаче оптимизации:

$$W = L(H_Q(\tilde{x}), \tilde{y}) \rightarrow \min_{C, Q},$$

где Q – количество непараметрических оценок, включенных в ансамбль; C – последовательность векторов параметров размытости:

$$C = \{\bar{c}_0, \bar{c}_1, \dots, \bar{c}_Q\}.$$

Однако оптимизация параметров размытости при добавлении каждой модели при большом объеме обучающей выборки требует большого количества вычислительных ресурсов. Вычислительная сложность зависит от выбранного метода оптимизации и от решаемой задачи и может быть оценена как $O(k\tilde{n})$ на каждом шаге, где k – количество вычислений критерия, $\tilde{n}$ – объем валидационной выборки. Значение k при этом может быть достаточно большим (особенно в случае высокой размерности пространства входных переменных). Для того чтобы избежать данной проблемы, в данной работе предлагается алгоритм последовательного пересчета параметров размытости, гарантирующий вычислительную сложность $O(m\tilde{n})$ на каждом шаге, где m – размерность пространства входных переменных. Параметры размытости пересчитываются по следующим формулам:

$$\{c_q^1, c_q^2, \dots, c_q^m\} = \{b^{a_q^1} c_{q-1}^1, b^{a_q^2} c_{q-1}^2, \dots, b^{a_q^m} c_{q-1}^m\},$$

$$a_q^j \in \{0, 1\}, \sum_{j=1}^m a_q^j = 1,$$

где значения вектора $\bar{a}_q$ указывают на то, какой именно параметр размытости должен быть уменьшен на шаге q . Для того чтобы определить значения $\bar{a}_q$, последовательно уменьшаем по одному из параметров размытости, строим оценку невязки текущего ансамбля, добавляем эту оценку к текущему ансамблю и вычисляем значение критерия качества. На основании значений критериев качества присваиваем следующие значения компонентам вектора $\bar{a}_q$: $a_q^j = 1$, если уменьшение j -го параметра размытости привело к наибольшему увеличению точности ансамбля, иначе $a_q^j = 0$. В случае получения одинаковых значений критерия качества при уменьшении нескольких параметров, произвольным образом выбирается один из этих параметров размытости, соответствующая ему компонента вектора $\bar{a}_q$ равна 1, остальные компоненты равны 0.

Вектор начальных параметров размытости $\bar{c}_0$ должен быть таким, чтобы оценка (1) существовала для любого вектора входных переменных $\tilde{x}$, каждая компонента которого лежит в интервале от минимального до максимального значений соответствующей компоненты, определенных по имеющейся обучающей выборке. Для того чтобы избежать дополнительных рас-

четов оценки (1) вектор начальных параметров размытости $\bar{c}_0$ может быть выбран следующим образом:

$$c_0^j = \max_i (x_i^j) - \min_i (x_i^j), j = 1, 2, \dots, m.$$

Параметр b непосредственно влияет на количество непараметрических оценок, которые будут включены в ансамбль: чем меньше b , тем быстрее ширина ядер в оценке (1) уменьшится до таких значений, что ядра перестанут захватывать наблюдения и процесс построения ансамбля прекратится. Выбор наилучшего параметра b можно сравнить с попыткой предсказать параметры размытости последней модели в ансамбле, а затем подобрать b , исходя из требований к количеству моделей в ансамбле. Параметры размытости последней модели связаны с особенностями решаемой задачи: распределения входных переменных, наличие сгустков наблюдений в обучающей выборке, плотность этих сгустков и т. д. Причем эта оценка всегда будет оценкой снизу, так как выполняется до построения ансамбля. Если b будет вычислен исходя из требования к количеству моделей в ансамбле, значение b может оказаться завышенным. Завышенное значение b приведет к остановке роста ансамбля при меньшем количестве моделей. Так как b непосредственно характеризует скорость изменения параметров, то завышенное b приводит к более быстрому уменьшению параметров размытости, что сказывается на точности. По этой причине построение нескольких ансамблей с различными значениями b и последующим выбором наилучшего представляется более выигрышной стратегией. Параметр b должен выбираться из диапазона от 0,5 до 1. На основании множества разнообразных численных экспериментов и решения прикладных задач идентификации рекомендуется значение параметра $b = 0,8$. Данное значение параметра в большинстве задач позволяет получать достаточно высокую точность при небольшом количестве моделей в ансамбле.

Оценка в разреженных областях пространства входных переменных. Покажем работоспособность данного подхода в условиях наличия разреженных областей в пространствах входных переменных.

Рассмотрим следующий численный эксперимент. Пусть имеется единственная входная переменная x , принимающая значения от 0 до 3, структуру объекта зададим уравнением $y = x^2 + 10$. После формирования обучающей выборки извлечем из нее все наблюдения со значением входной переменной от 1 до 2. К получившемуся набору данных применим предлагаемый подход к построению ансамблей непараметрических оценок регрессии. На рис. 3 показаны ансамбли, состоящие из одной, двух и пяти моделей.

Сравнение единственной непараметрической оценки регрессии и предложенного в работе ансамбля приведено на рис. 4.

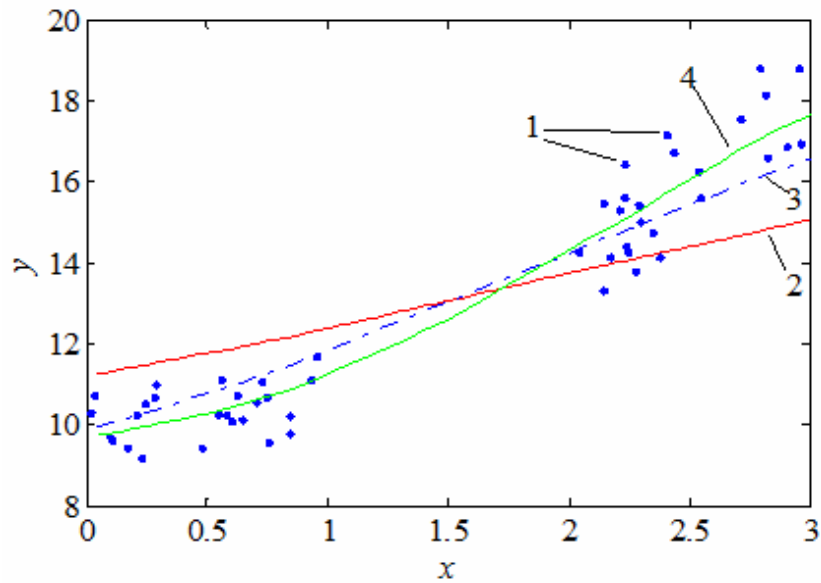


Рис. 3. Построение ансамбля непараметрических оценок (1) для разреженных областей:
1 – обучающая выборка; 2 – базовая оценка; 3 – ансамбль, состоящий из суммы двух непараметрических оценок; 4 – ансамбль, состоящий из суммы пяти непараметрических оценок

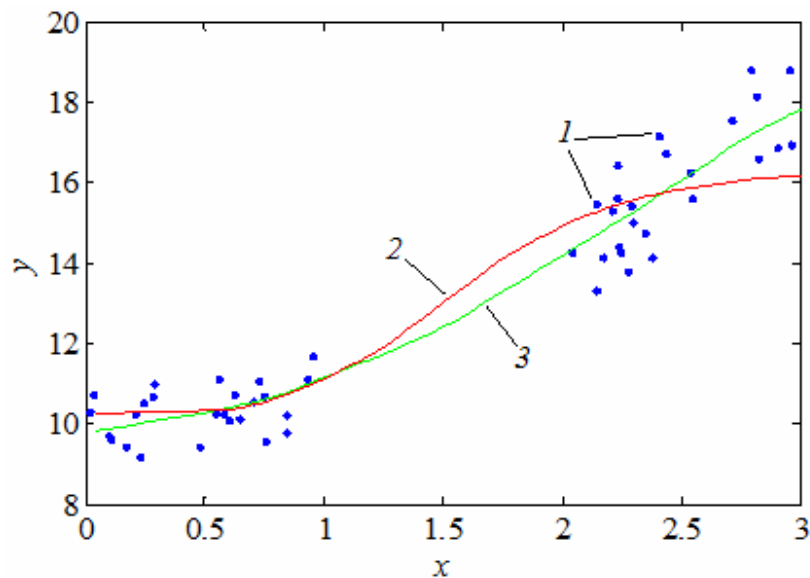


Рис. 4. Сравнение единственной непараметрической оценки регрессии и ансамбля для разреженных областей:
1 – обучающая выборка; 2 – непараметрическая оценка регрессии с настроенным параметром размытости; 3 – ансамбль, состоящий из суммы пяти непараметрических оценок

В ходе численных исследований было показано, что точность ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона превосходит единственную оценку как в разреженных областях пространства входных переменных, так и в областях с большим количеством наблюдений. Следует также отметить, что для многомерных задач разница в точности между ансамблем и единственной оценкой становится более значительной.

Оценка на границах пространства входных переменных и экстраполяция. Добавление каждой последующей непараметрической оценки в ансамбль

направлено на то, чтобы уменьшить ошибку текущего ансамбля. Поэтому большое влияние на итоговую оценку оказывают наблюдения, близкие к границе области входных переменных, так как в силу особенности своего построения точность непараметрической оценки у границы меньше [14], а следовательно, больше значения невязок между выходом объекта и выходом текущего ансамбля и больше вклад в итоговую оценку.

Рассмотрим следующий численный эксперимент. Пусть имеется единственная входная переменная x ,

принимая значения от 0 до 3, структуру объекта зададим уравнением $y = x^2 + 10$. Оценку будем строить на интервале от 0 до 4. К получившемуся набору данных применим предлагаемый подход к построению ансамблей непараметрических оценок регрессии. Последовательность ансамблей $H_0(x)$, $H_1(x)$, ..., $H_4(x)$ показана на рис. 5. Нетрудно видеть, что вблизи гра-

ничных значений (0 и 3) различия между этими ансамблями больше.

Сравнение единственной непараметрической оценки регрессии и предложенного в работе ансамбля приведено на рис. 6. Следует отметить, что ансамбль непараметрических оценок может быть использован и для экстраполяции.

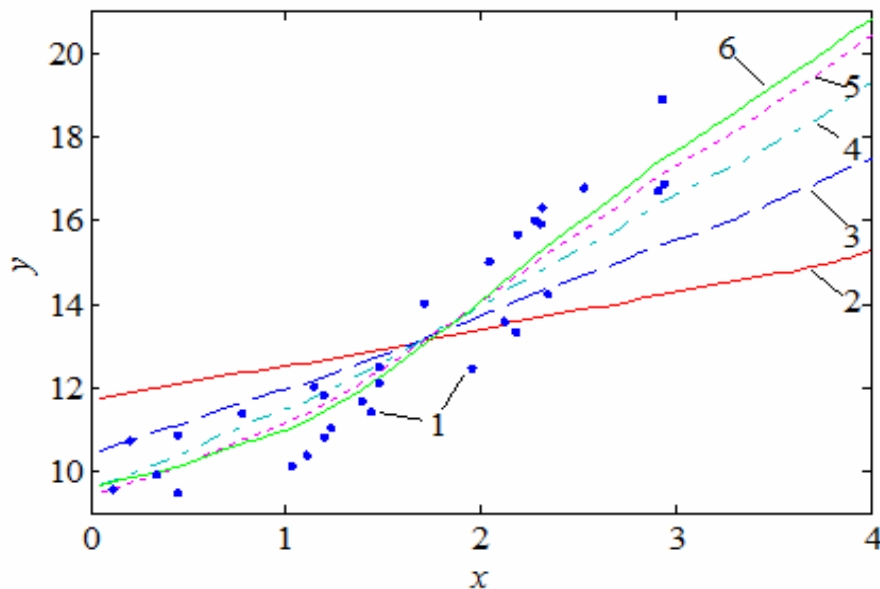


Рис. 5. Построение ансамбля непараметрических оценок (1) для границы области входных переменных:

1 – обучающая выборка; 2 – базовая оценка; 3 – ансамбль, состоящий из суммы двух непараметрических оценок; 4 – ансамбль, состоящий из суммы трех непараметрических оценок; 5 – ансамбль, состоящий из суммы четырех непараметрических оценок; 6 – ансамбль, состоящий из суммы пяти непараметрических оценок

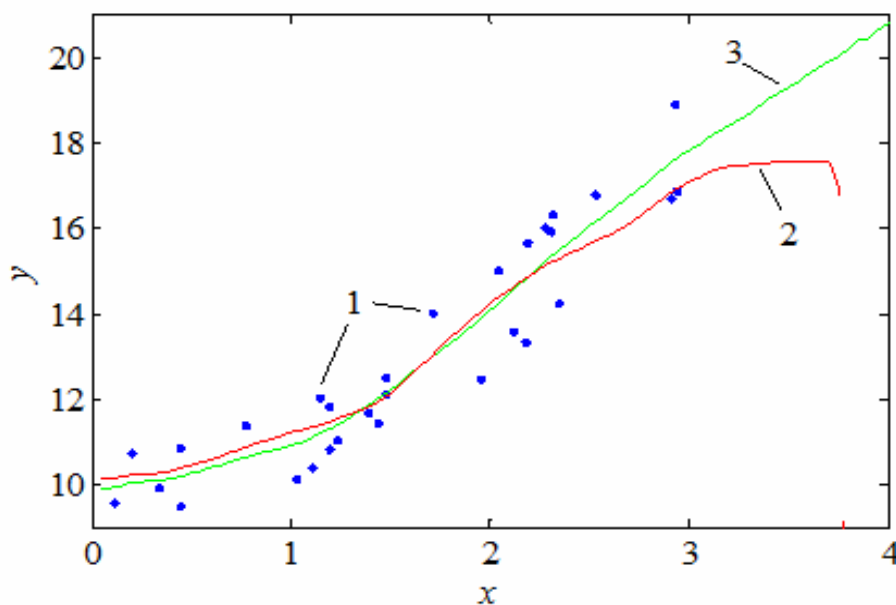


Рис. 6. Сравнение единственной непараметрической оценки регрессии и ансамбля для границы области входных переменных:

1 – обучающая выборка; 2 – непараметрическая оценка регрессии с настроенным параметром размытости; 3 – ансамбль, состоящий из суммы пяти непараметрических оценок

В ходе численных исследований была показана высокая эффективность предложенного ансамбля при оценке вблизи границ области входных переменных, а также за ними. Для многомерных задач разница в точности между ансамблем и единственной оценкой становится более значительной.

Заключение. Предложен подход к обучению ансамбля непараметрических оценок Надарая–Ватсона, позволяющий повысить точность восстановления зависимости между входными переменными и выходной переменной по наблюдениям. Разнообразные численные эксперименты свидетельствуют о высокой эффективности предложенного подхода к формированию ансамблей непараметрических оценок при наличии разреженных областей в пространстве входных переменных, а также на границах этого пространства.

Библиографические ссылки

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition. 2009. 312 p.
2. Polikar R. Ensemble Based Systems in Decision Making // *IEEE Circuits and Systems Magazine*. Third quarter. 2006. P. 21–45.
3. Kuncheva L. I. Combining Pattern Classifiers, Methods and Algorithms. New York : Wiley Interscience, 2005. 360 p.
4. Мангалова Е. С., Агафонов Е. Д. О проблеме генерации разнообразия ансамблей индивидуальных моделей в задаче идентификации [Электронный ресурс] // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления. URL: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/procdngs/3214.pdf>. (дата обращения: 10.1.2015).
5. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R. A., Stone C. J. Classification and Regression Trees. Wadsworth, Belmont, 1984.
6. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. 45 (1). P. 5–32.
7. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine [Electronic resource]. URL: <http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/trebst.pdf> (available: 10.1.2015).
8. Friedman J. H. Stochastic Gradient Boosting [Electronic resource]. URL: <http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/stobst.pdf> (available: 10.1.2015).
9. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983. 194 с.
10. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Холод И. И. Анализ данных и процессов. СПб. : BHV, 2009. 512 с.
11. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1995. Т. 2. С. 201–206.
12. Корнеева А. А., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. О непараметрическом анализе данных в задаче идентификации // Управление, вычислительная техника и информатика : вестн. Том. гос. ун-та. 2013. № 1 (22). С. 86–96.
13. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
14. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 349 с.
15. Schapire R. E. The strength of weak learnability // *Machine Learning*. 1990. Vol. 5, no. 2. Pp. 197–227.

References

1. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition, 2009, 312 p.
2. Polikar R. Ensemble Based Systems in Decision Making. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, third quarter 2006, P. 21–45.
3. Kuncheva L. I. Combining Pattern Classifiers, Methods and Algorithms. New York, NY : Wiley Interscience, 2005, 360 p.
4. Mangalova E. S., Agafonov E. D. [Variety of individual models ensembles for identification generation problem]. *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya*. [Proceedings of the XII All-Russian meeting on governance]. Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/proceedings/procdngs/3214.pdf> (In Russ.)
5. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R. A., Stone C. J. Classification and Regression Trees. Wadsworth Inc, Belmont, 1984.
6. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, No. 45 (1), P. 5–32.
7. Friedman J. H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. Available at: <http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/trebst.pdf> (accessed 10.1.2015).
8. Friedman J. H. Stochastic Gradient Boosting. Available at: <http://www-stat.stanford.edu/~jhf/ftp/stobst.pdf> (accessed 10.1.2015).
9. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie otsenki plotnosti veroyatnosti i krivoj regressii* [Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve]. Tbilisi, Izd Tbil. un-ta Publ., 1983, 194 p.
10. Barsegyan A. A., Kupriyanov M. S., Holod I. I. *Analiz danih i protsessov* [Analysis of data and processes]. St. Petersburg, BHV, 2009, 512 p. (In Russ.).
11. Medvedev A. V. [Data analysis in the identification problem]. *Komp'yuternyi analiz danih modelirovaniya*. 1995, Vol. 2, P. 201–206 (In Russ.).
12. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. [Nonparametric data analysis in the identification problem]. *Vestnik TGU* 2013, Vol. 1 (22), P. 86–96 (In Russ.).
13. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptacii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p. (In Russ.).
14. Hardle W. *Prikladnaya neperametriceskaya regressiya* [Applied nonparametric regression]. Mir Publ., 1993, 349 p.
15. Schapire R. E. The strength of weak learnability. *Machine Learning*, Vol. 5, No. 2, P. 197–227, 1990.

ГРУППЫ ШУНКОВА, НАСЫЩЕННЫЕ ГРУППАМИ $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$ Е. А. Пронина¹, А. А. Шлепкин^{2*}¹Красноярский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 660130, г. Красноярск, ул. Стасовой, 44и²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: ak_kgau@mail.ru

Исследованы группы Шункова, насыщенные группами $L_2(p^n)$ – проективные специальные линейные группы степени 2 над конечными полями, $U_3(2^n)$ – проективные специальные унитарные группы степени 3 над полями четной характеристики. Произвольная группа называется группой Шункова, если в каждом ее сечении по конечной подгруппе любая пара сопряженных элементов простого порядка порождает конечную подгруппу.

Под периодической частью $T(G)$ группы G понимается подгруппа, порожденная всеми элементами конечных порядков из G при условии, что она периодическая.

Представлен ряд лемм, в которых доказывается следующее:

- G содержит бесконечно много элементов конечного порядка;
- в G найдутся такие конечные подгруппы K_1 и K_2 , что $K_1 \cong L_2(p^n)$ и $K_2 \cong U_3(2^n)$, но $K_1 \not\subset X$ ни для какой группы из $\mathfrak{R}(1)$ такой, что $X = U_3(2^n)$;
- силовская 2-подгруппа S группы G локально конечна, и $|g| \leq 4$ для любого $g \in S$;
- все инволюции из S лежат в $Z(S)$;
- для любого $h \in G$ со свойством $h^2 \in S$ следует, что $h \in S$;
- если V – силовская 2-подгруппа из G и $V \cap S \neq 1$, то $V = S$;
- все силовские 2-подгруппы из G сопряжены;
- если $K \in \mathfrak{R}(1)$ и $K \cong L_2(p^n)$, то $p = 2$;
- подгруппа $N_G(S)$ обладает периодической частью $T(N_G(S)) = B = S \rtimes H$, где H – локально циклическая периодическая группа без инволюций;
- подгруппа B вложима в локально конечную простую подгруппу L группы G , изоморфную $U_3(Q)$, где Q – локально конечное поле характеристики 2;
- если a – произвольный неединичный элемент из H_0 , то $N_G(\langle a \rangle) = N_G(H)$ обладает периодической частью N , и $N = N_L(H) = H \rtimes \langle t \rangle$, где t – инволюция.

На основании вышеуказанных лемм доказывается следующая теорема: группа Шункова, насыщенная множеством групп вида $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$, обладает периодической частью $T(G)$, изоморфной либо $L_2(P)$, либо $U_3(Q)$ для подходящих локально конечных полей P и Q .

Ключевые слова: группы Шункова, насыщенность, периодическая часть.

SHUNKOV GROUPS, SATURATED BY GROUPS $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$ Е. А. Pronina¹, А. А. Shlepkin^{2*}¹Krasnoyarsk State Agrarian University
44 I, Stasova St., Krasnoyarsk, 660130, Russian Federation²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: ak_kgau@mail.ru

Investigated are Shunkov groups, saturated by groups $L_2(p^n)$ (projective special linear group of degree 2 over finite fields), $U_3(2^n)$ (projective special unitary group of degree 3 over fields of odd characteristics). Arbitrary group is called a Shunkov group, if every cross section by a finite subgroup of any pair of conjugate elements of Prime order generates a finite subgroup.

Under periodic part $T(G)$ group G is the subgroup generated by all elements of finite order of G , provided that it is periodic.

Presented is a series of lemmas, in which we prove that:

- G contains infinitely many elements of finite order;
- In G there are finite subgroups K_1 and K_2 , that $K_1 \cong L_2(p^n)$ and $K_2 \cong U(2^n)$, but $K_1 \not\subset X$ for no group of $\mathfrak{R}(1)$ such that $X \cong U_3(2^n)$;
- Sylow 2-subgroup S , group G , locally finite and $|g| \leq 4$ for any $g \in S$;
- All involution of S lies in $Z(S)$;
- For any $h \in G$ with the property $h^2 \in S$ it follows that $h \in S$;
- If V is a Sylow 2-subgroup of G and $V \cap S \neq 1$, then $V = S$;
- All Sylow 2-subgroups of G are conjugate;
- If $K \in \mathfrak{R}(1)$ and $K \cong L_2(p^n)$, then $p = 2$;
- Subgroup $N_G(S)$ has a periodic part $T(N_G(S)) = B = S \rtimes H$, where H is a locally periodic cyclic group without involutions;
- The subgroup B is embeddable in locally finite simple subgroup L group G that is isomorphic $U_3(Q)$, where Q is a locally finite field of characteristic 2;
- If the a for arbitrary nonunit element of H , then $N_G(\langle a \rangle) = N_G(H)$ has a periodic part N and $N = N_L(H) = H \rtimes \langle t \rangle$, where t is an involution.

Based on the above lemmas, we prove the theorem: the Shunkov group saturated by multiple groups of the form $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$ has a periodic part $T(G)$, is isomorphic to either $L_2(P)$, or $U_3(Q)$, for suitable locally of finite fields P and Q .

Keywords: group Shunkov, saturation, periodic part.

1. Введение

В [1] поставлен вопрос 14.101: Группа G насыщена группами из класса X , если любая конечная подгруппа $K \leq G$ содержится в подгруппе $L \leq G$, изоморфной некоторой группе из X . Верно ли, что периодическая группа, насыщенная конечными простыми группами лиевского типа, ранги которых ограничены в совокупности, сама является простой группой лиевского типа конечного ранга?

В данной статье эта задача решается частично. Исследованы группы Шункова, насыщенные группами $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$.

Произвольная группа называется группой Шункова, если в каждом ее сечении по конечной подгруппе любая пара сопряженных элементов простого порядка порождает конечную подгруппу. Подчеркнём, что группа Шункова, порождённая элементами конечных порядков, не обязана быть периодической. Примеры таких смешанных групп существуют уже в классе разрешимых групп [2]. Поэтому для групп Шункова актуален вопрос о расположениях её элементов конечных порядков, в частности, составляют ли они характеристическую подгруппу $T(G)$ – периодическую часть. Под периодической частью $T(G)$ группы G понимается подгруппа, порожденная всеми

элементами конечных порядков из G , при условии, что она периодическая. Получен следующий результат.

Теорема. Группа Шункова, насыщенная множеством групп вида $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$, обладает периодической частью $T(G)$, изоморфной либо $L_2(P)$, либо $U_3(Q)$, где P и Q – подходящие локально конечные поля.

2. Известные факты и определения

Определение 1. Под символом e в данной работе будем понимать единицу группы G .

Определение 2. Группа G насыщена группами из множества групп $\mathfrak{M}$, если любая конечная подгруппа из G содержится в подгруппе, изоморфной некоторой группе из $\mathfrak{M}$.

Множество $\mathfrak{M}$ будем называть насыщающим множеством для G .

$\mathfrak{M}(K)$ – это множество всех подгрупп группы G , содержащих подгруппу $K \subseteq G$ и изоморфных группам из множества $\mathfrak{M}$.

$\mathfrak{M}(1)$ – это множество всех подгрупп группы G , изоморфных группам из множества $\mathfrak{M}$ (1 – единичная подгруппа группы G) [3].

Предложение 1. Пусть $G = L_2(q)$, где $q = p^n > 3$ – нечетное число. Тогда справедливы следующие утверждения:

1) силовская p -подгруппа P группы G – элементарная абелева, и $B = N_G(P) = P \rtimes H$ – группа Фробениуса с ядром P и циклическим неизменяемым множителем H порядка $(q-1)/2$;

2) силовская 2-подгруппа группы G является группой диэдра;

3) если a – инволюция из G , то $C_G(a)$ – группа диэдра;

4) группа G порождается любыми двумя различными централизаторами инволюций;

5) все инволюции из G сопряжены [4].

Предложение 2. Пусть $G = L_2(q)$, где $q = 2^n > 2$, P – силовская 2-подгруппа группы G . Тогда:

1) P – элементарная абелева группа, и любые две силовские 2-подгруппы группы G пересекаются тривиальным образом, в частности, $C_G(a) = P$ для любой инволюции $a \in P$;

2) $B = N_G(P) = P \rtimes H$ – группа Фробениуса с ядром P и циклическим неизменяемым множителем H порядка $q-1$, действующим транзитивно на множестве $P^\#$;

3) $N = N_G(H) = H \rtimes \langle t \rangle$ – группа диэдра;

4) если K – подгруппа в G и K обладает нормальной подгруппой нечетного порядка, то $N_G(K)$ – группа диэдра;

5) G порождается любыми двумя силовскими 2-подгруппами;

6) все инволюции из G сопряжены [4].

Предложение 3. Расширением локально конечной группы при помощи локально конечной группы есть локально конечная группа [5].

Предложение 4. Пусть S – конечная подгруппа бесконечной 2-группы T . Тогда $N_T(S) \neq S$ [6].

Предложение 5. Если некоторая силовская 2-подгруппа T группы Шункова G конечна, то любая силовская 2-подгруппа группы G сопряжена с T [6].

Предложение 6. Произвольная группа, порядки элементов которой не превосходят 4, локально конечна [7; 8].

Предложение 7. Бесконечная локально конечная группа содержит бесконечную абелеву подгруппу [5].

Предложение 8. Пусть локально конечная группа G является объединением цепочки $G_1 < G_2 < G_3 < \dots$ конечных простых групп Шевалле, лиев ранг которых ограничен в совокупности. Тогда G – простая группа Шевалле конечного лиева ранга над локально конечным полем [9–12].

Предложение 9. Пусть $G = U_3(2^n)$, P – силовская 2-подгруппа группы G и $B = N_G(P)$. Тогда:

1) $G = B \langle v \rangle B$, где v – инволюция и $B \cap B^v = H$ – подгруппа Картана;

2) P – группа периода 4, степени нильпотентности 2, и $P' = Z(P) = \Phi(P) = \Omega_1(P)$;

3) любые две силовские 2-подгруппы группы G имеют тривиальное пересечение;

4) если a – инволюция из P , то $C_G(a) = P \rtimes H_1$, где H_1 – циклическая группа, причем $H_1 \leq B$ и $Z(P) \leq C_G(H_1)$;

5) $B = P \rtimes H$, где H – циклическая группа порядка $\frac{2^{2n}-1}{d}$, где $d=3$, если 3 делит число 2^n+1 , и $d=1$ в противном случае;

6) $H = H_0 \times H_1$, где H_1 – подгруппа из утверждения 4, $|H_0| = 2^n - 1$ и $|H_1| = \frac{2^n+1}{d}$, причем v инвертирует H_0 и централизует H_1 ;

7) $P \rtimes H_0$ – группа Фробениуса с неизменяемым множителем H_0 , действующим транзитивно на множестве инволюций группы P ;

8) $C_G(H_1) = H_1 \times L$, где $L \cong L_2(2^n)$ и $S = L \cap P$ – силовская 2-подгруппа в L ;

9) $B/Z(P)$ – группа Фробениуса с ядром $P/Z(P)$ и дополнением $HZ(P)/Z(P)$, при этом фактор-группа $HZ(P)/Z(P)$ либо транзитивна на множестве неединичных элементов фактор-группы $P/Z(P)$, либо имеет ровно 3 орбиты;

10) G порождается любой парой своих силовских 2-подгрупп;

11) для любого простого 2'-элемента $a \in G$ подгруппа $N_G(\langle a \rangle)$ имеет четный порядок;

$$12) |U_3(2^n)| = \frac{1}{(3, 2^n+1)} 2^{3n} (2^{2n}-1)(2^{3n}+1) \quad [13].$$

Предложение 10. Группы Шункова с бесконечным числом элементов конечного порядка содержат бесконечную локально конечную подгруппу [14].

Предложение 11. Пусть G содержит лишь конечное число элементов конечного порядка, тогда все они составляют в G конечную вполне характеристическую подгруппу [15].

Предложение 12. Группа Шункова G насыщена на группами из множества $\{U_3(2^n)\}$, обладающая периодической частью $T(G)$, которая изоморфна $U_3(Q)$ для подходящего локально конечного поля характеристики 2 [16].

3. Доказательство теоремы

Предположим обратное, пусть G – контрпример, а $\mathfrak{A} = \{L_2(p^n), U_3(2^n)\}$ – насыщающее множество групп для G .

Лемма 1. G содержит бесконечно много элементов конечного порядка.

Доказательство. Предположим обратное. Тогда по лемме Дицмана (предложение 11) G обладает периодической частью $T(G)$, которая по условию насыщенности изоморфна либо $L_2(p^m)$, либо $U_3(2^n)$ для подходящих n и m . Противоречие с выбором G .

Лемма доказана.

Лемма 2. Пусть a – инволюция из G . Тогда $C_G(a)$ содержит бесконечно много элементов конечного порядка.

Доказательство. Предположим обратное. Тогда порядки групп из $\mathfrak{R}(1)$ ограничены в совокупности (предложение 2, пункт 3; предложение 3, пункт 2; предложение 9, пункт 6). Следовательно, и порядки конечных подгрупп из G также ограничены в совокупности. По лемме 1 группа G содержит бесконечную локально конечную подгруппу, следовательно, содержит конечную подгруппу сколь угодно большого порядка, что невозможно.

Лемма доказана.

Лемма 3. Если группа G удовлетворяет условию теоремы, то все инволюции в G сопряжены.

Доказательство. Пусть a, b – произвольные инволюции из G . Тогда $L = \langle a, b \rangle$ – конечная группа, и по условию теоремы $L \leq M < G$, где $M = L_2(p^n)$ или $M = U(2^n)$. По предложению 1 (пункт 5), предложению 2 (пункт 2) и предложению 9 (пункт 7) инволюции a и b сопряжены в M .

Лемма доказана.

Лемма 4. В $\mathfrak{R}(1)$ найдутся такие конечные группы K_1 и K_2 , что $K_1 = L_2(p^n)$, $K_2 = U(2^n)$, но $K_1 \not\subset X \in \mathfrak{R}(1)$ ни для какого $X = U_3(2^m)$.

Доказательство. Предположим обратное. Тогда множество $\mathfrak{R}(1)$ для G может иметь одну из следующих двух взаимоисключающих структур:

$$\mathfrak{R}(1) = \{L_2(p^n)\}, \quad (1)$$

$$\mathfrak{R}(1) = \{U(2^n)\}. \quad (2)$$

Но в случае (1) G обладает периодической частью $T(G) = L_2(P)$ для подходящего локально конечного поля P [17], а в случае (2) G обладает периодической частью $T(G) = U(Q)$ для подходящего локально конечного поля Q [6]. Противоречие с выбором G .

Лемма доказана.

Пусть K_1 и K_2 из леммы 4. Обозначим через S_{K_1} силовскую 2-подгруппу из K_1 , а через S_{K_2} силовскую 2-подгруппу из K_2 , где K_1 и K_2 – подгруппы группы G . Пусть далее $K \in \mathfrak{R}(1)$, а S_K – ее силовская 2-подгруппа. Мы будем говорить, что K типа K_1 (соответственно K_2), если $K = L_2(p^n)$ (соответственно $K = U_3(2^n)$). Мы будем говорить также, что S_K типа

S_{K_1} (соответственно типа S_{K_2}), если S_K изоморфна силовской 2-подгруппе из K , и $K = L_2(p^n)$ (соответственно S_K изоморфна силовской 2-подгруппе из K , и $K = U_3(2^n)$). Обозначим через S некоторую силовскую 2-подгруппу группы G .

Доказательство теоремы для случая, когда S – конечная группа. По предложению 5 можно считать, что $S_{K_1} \leq S$ и $S_{K_2} \leq S$. Следовательно, S типа S_{K_2} , а S_{K_1} – элементарная абелева, и либо $K_1 = L_2(2^n)$, либо $K_1 = L_2(p^n)$, $p \equiv 3, 5 \pmod{8}$ (предложения 1, 2).

Так как S – конечная группа, то порядок групп типа K_2 ограничен в совокупности, и множество $\mathfrak{R}(1)$ содержит лишь конечное число неизоморфных подгрупп типа K_2 , их порядки ограничены в совокупности. Из таких же соображений неизоморфных групп типа $K_1 = L_2(2^n)$ также конечное подмножество в $\mathfrak{R}(1)$, и их порядки ограничены в совокупности. Рассмотрим в G конечную подгруппу K типа $K_1 = L_2(p^n)$, $p \equiv 3, 5 \pmod{8}$. В этом случае силовская 2-подгруппа группы K_1 – $S_{K_1} = \langle i \rangle \times \langle j \rangle$ – элементарная абелева группа порядка 4. Здесь $i^2 = j^2 = e$. По предложению 1 $C_{K_1}(i) = \langle d \rangle \ltimes \langle j \rangle$, где d – циклическая группа порядка $2m$ и m – нечетное. По предложению 9 (пункты 3, 4) $jd \in Z(S)$. В этом случае $j d = d \in S$, что невозможно, так как d – элемент нечетного порядка. Противоречие. Следовательно, порядок всех групп из $\mathfrak{R}(1)$ ограничен в совокупности некоторым числом k . Однако, G – группа Шункова с бесконечным числом элементов конечного порядка и, следовательно, содержит бесконечную локально конечную подгруппу (предложение 10). Следовательно, G содержит конечную подгруппу N со свойством $|N| > k$. По условию насыщенности, $N \subseteq N_1 \in \mathfrak{R}(1)$, $k < |N| \leq |N_1| = |X| < k$, т. е. $k < k$. Противоречие.

Теорема для случая, когда S – конечная группа, доказана.

Доказательство теоремы для случая, когда S – бесконечная группа. Докажем следующую лемму.

Лемма 5. S – локально конечная группа, и $|g| \leq 4$ для любого $g \in S$.

Доказательство. Предположим, что для некоторого $g \in S, |g| = 8$. Обозначим через i инволюцию из $\langle g \rangle$. По лемме 3 все инволюции в G сопряжены, и, следовательно, можем считать, что $i \in D$, где D – конечная 2-подгруппа из G типа S_{K_2} . Обозначим через h элемент из G порядка четыре со свойством $h^2 = i$ и $\langle g^2 \rangle \neq \langle h \rangle$. Рассматривая конечную группу $\langle g^2, h \rangle$, заключаем, что она лежит в $C_G(i)$, а так как она содержит две различные подгруппы порядка 4,

то она лежит в некоторой подгруппе M типа K_2 . M не может быть типа K_1 , так как в последней централизатор инволюции является группой диэдра, а в группе диэдра централизатор инволюции содержит только одну циклическую порядка четыре, если она есть (предложение 1). Это означает, что в M найдется инволюция $v \neq i$ такая, что $v \in C_G(g^2)$. Конечная группа $\langle g, v \rangle \subset M \in \mathfrak{R}(1)$. Поскольку M содержит элемент порядка 8, то $M \cong L_2(p^n)$, где $p \neq 2$. Тогда $C_M(i)$ – группа диэдра. Но тогда $g^v = g^{-1}$ и $(g^2)^v = g^{-2}$, хотя, с другой стороны, $(g^2)^v = g^2$. Противоречие. Итак, для любого $g \in S, |g| < 8$, и по предложению 6 S – локально конечна.

Лемма доказана.

Лемма 6. Все инволюции из S лежат в $Z(S)$.

Доказательство. По лемме 5 S – бесконечная локально конечная группа экспоненты 4. Так как S содержит бесконечную абелеву группу (предложение 7), то S содержит элементарную абелеву подгруппу I порядка 8. Предположим, что v – инволюция из S и $v \notin Z(S)$. Тогда в S найдется такой элемент w , что $wz \neq zw$. Рассмотрим конечную подгруппу $F = \langle I, v, w \rangle \subset S$. По условию насыщенности она лежит в некоторой конечной 2-подгруппе R типа S_{K_2} , и v лежит в $Z(I)$. Значит $wv = vw$. Противоречие.

Лемма доказана.

Лемма 7. Для любого $h \in G$ со свойством $h^2 \in S$ следует, что $h \in S$.

Доказательство. Предположим обратное. Пусть v – инволюция из S , и $b^2 = v$. Предположим, что $b \notin S$. Пусть w – другая, отличная от v , инволюция из S . Конечная группа $R = \langle w, b \rangle \subset C_G(v)$. Если R – группа диэдра, то $R = \langle b \rangle \rtimes \langle w \rangle$ и $b^w = b^{-1}$. Обозначим через M силовскую 2-подгруппу из G , содержащую R . Как было показано в лемме 7, все инволюции из M лежат в $Z(M)$. Но $b^w = b^{-1}$. Противоречие. Следовательно, R лежит в некоторой конечной группе типа K_2 , т. е. $w \in C_G(b)$. Так как в этом случае $S\langle b \rangle$ – 2-группа и S – силовская 2-подгруппа из G , то $S\langle b \rangle = S$ и $b \in S$. Противоречие с выбором b .

Лемма доказана.

Лемма 8. Пусть V – силовская 2-подгруппа из G и $V \cap S \neq 1$. Тогда $V = S$.

Доказательство. Пусть $i \in V \cap S$ и $|i| = 2$. Возьмем такой элемент $b \in G$, что $b^2 = i$. По лемме 7 $b \in V \cap S$. Выберем инволюции $x \in V$ и $y \in S$. По лемме 6 $x, y \in C_G(b)$. Следовательно, группа $\langle x, y, b \rangle$ – конечна, является 2-группой и вложима, по

условию насыщенности, в некоторую конечную 2-подгруппу $R \subset G$ и R – типа K_2 . Следовательно, инволюции x, y перестановочны. В силу произвольности выбора x, y получаем, что $\langle Z(V), Z(S) \rangle$ – элементарная абелева 2-группа, которая лежит в некоторой силовской 2-подгруппе M группы G . По лемме 7 S и V лежат в M . Следовательно $M = S = V$.

Лемма доказана.

Лемма 9. Все силовские 2-подгруппы из G сопряжены.

Доказательство. Пусть V – другая, отличная от S , силовская 2-подгруппа группы G . Так как все инволюции из G сопряжены, то для некоторого $g \in G, V^g \cap S \neq 1$. Но тогда по лемме 8 $V^g = S$.

Лемма доказана.

Лемма 10. Пусть $K \in \mathfrak{R}(1)$ и $K \cong L_2(p^n)$. Тогда $p = 2$.

Доказательство. Предположим обратное, что $p \neq 2$, и пусть S_K – силовская 2-подгруппа из K . Как известно, $S_K = \langle b \rangle \rtimes \langle i \rangle$ – группа диэдра (предложение 1). Так как $S_K \subset S$ – силовская 2-подгруппа, то по лемме 6 $|b| = 2$ и $p \equiv 3, 5 \pmod{8}$. Но это возможно (см. доказательство теоремы для случая, когда S – конечная группа) только для случая $p = 3, n = 1$ и $p = 5, n = 1$. Во втором случае $L_2(5) \cong L_2(2^2)$, и мы попадаем под утверждение леммы. В первом случае $L_2(3) = \langle b \rangle \rtimes \langle i \rangle$, где $b^3 = i^2 = e$ и $b^i = b^{-1}$. Пусть z – инволюция из $C_G(i)$ и $z \neq i$. Так как G – группа Шункова, то $\langle b, b^z, i \rangle$ – конечная группа, которая по условию насыщенности лежит в некоторой группе $K \in \mathfrak{R}(1)$. Очевидно, $K \neq L_2(3)$ и $K \neq L_2(5)$. Следовательно, $K = L_2(2^m)$ или $K = U_3(2^l)$ для подходящих m и l . Поэтому группу $L_2(3)$ мы можем выбросить из насыщающего множества.

Лемма доказана.

Лемма 11. Подгруппа $N_G(S)$ обладает периодической частью $T(N_G(S)) = B = S \rtimes H$, где H – локально циклическая периодическая группа без инволюций, $H = H_0 \times H_1$, $\pi(H_0) \cap \pi(H_1) = \emptyset$, $S \rtimes H_0$ – группа Фробениуса с ядром S' и неинвариантным множителем H_0 , $H_1 \subset C_G(Z(S))$, $S \rtimes H / Z(S) = \bar{S} \rtimes \bar{H}$ – группа Фробениуса с ядром $\bar{S}$, неинвариантным множителем $\bar{H} \cong H_0 \times H_1$.

Доказательство. По леммам 4, 8 $\bar{N} = N_G(S) / S$ – группа Шункова без инволюций, содержащая бесконечно много элементов конечного порядка. Возьмем элемент $\bar{b} \in \bar{N}$ и $|\bar{b}| = q$ – простое число, не равное 2. Тогда для любого $\bar{x} \in \bar{N}$, $\bar{L}_x = \langle \bar{b}, \bar{b}^{\bar{x}} \rangle$ – конечная группа. По теореме Шмидта (предложение 3), ее полный прообраз в G , группа L_x локально конечна.

Пусть $\bar{x} = xS$ и $\bar{b} = bS$ для некоторых $x, b \in G$. Тогда $L_x = \langle b, b^x, S \rangle$. Выберем в S конечную подгруппу M типа S_{K_2} . В силу замечания, сделанного выше, группа $\langle b, b^x, K \rangle$ конечна и вложима в некоторую конечную простую неабелеву подгруппу M_1 группы G типа K_2 . Обозначим ее через M_1 . Из способа выбора M_1 вытекает, что $b, b^x \in N_{M_1}(D)$, где $D \in \text{Syl}_2 M_1$. Теперь из предложения 9 (пункты 5–7) заключаем, что $D \rtimes \langle b \rangle = D \rtimes \langle b^x \rangle$ и $\langle b^x \rangle = \langle b^d \rangle$ для некоторого $d \in D$. Так как $D \subset S$, то $\langle \bar{b}^x \rangle = \langle \bar{b} \rangle$ в N . В силу произвольности выбора x из N получим, что $\langle \bar{b} \rangle \triangleleft \bar{N}$. Пусть $\langle \bar{b}_1 \rangle$ – другая, отличная от $\langle \bar{b} \rangle$, подгруппа простого порядка p из $\bar{N}$. Точно так же, как и для $\langle \bar{b} \rangle$, показывается, что $\langle \bar{b}_1 \rangle \triangleleft \bar{N}$. Следовательно, $\langle \bar{b} \rangle \times \langle \bar{b}_1 \rangle$ – конечная элементарная абелева подгруппа порядка p^2 из $\bar{N}$. Её полный прообраз в G группа $\langle b_1, b, S \rangle$ – локально конечная по теореме Шмидта (предложение 3) (здесь b_1 такой элемент из G , что $\bar{b}_1 = b_1 S$). Теперь выбираем в S конечную подгруппу C типа S_{K_2} , а конечную подгруппу $\langle b_1, b, C \rangle$ вкладываем по условию насыщенности в конечную подгруппу G типа K_2 , которую обозначим через C_1 . Из предложения 9 (пункты 5–7) получаем, что $\langle b_1 \rangle V = \langle b \rangle V$, где $V \in \text{Syl}_2 C_1$. Но тогда, $\langle b_1 \rangle S = \langle b \rangle S$ (лемма 8). Противоречие с выбором $\bar{b}_1$. Итак, для любого $p \in \pi(\bar{N})$ $\bar{N}$ содержит единственную подгруппу порядка p . Так как G – группа Шункова, то, используя приведенную выше технику, получаем, что N обладает периодической частью $T(N)$, которая локально циклическая, а ее полный прообраз в G есть $T(N_G(S)) = S \rtimes H$, где H – локально циклическая подгруппа. Кроме того, что все инволюции из $B = S \rtimes H$ сопряжены в B, H_0 действует транзитивно на множестве инволюций из S , и $\bar{S} \rtimes \bar{H}$ – группа Фробениуса.

Лемма доказана.

Лемма 12. Для любого нетривиального элемента $h \in H_0$ выполняется $T(C_G(h)) = H$. В частности, $T(C_G(H)) = H$.

Доказательство. Группа H абелева, и H_0 действует на S без неподвижных точек. Поэтому $C_B(h) = H$. Действительно, если $c \in B$, то $c = xy$, где $x \in H$, а $y \in S$. Тогда $h^c = h^{xy} = h^y h$, $y = e$, $c = x \in H$. Противоречие с выбором c . Предположим, что существует элемент c в $C_G(h) \setminus H$ и c –

конечного порядка. Тогда $c \notin B$. Пусть z – инволюция из S . Тогда $D = \langle z, z^c \rangle$ – конечная группа диэдра порядка $2m$ для некоторого m . Если m чётно, то z и z^c централизуют инволюцию d из D . По лемме 8 $d \in S$, $z^c \in S$ и $z \in S^{c^{-1}}$, $S^{c^{-1}} = S$ и $c \in B$, противоречие. Таким образом, m нечётно, и значит существует инволюция i группы D такая, что $z^i = z^c$, $ic^{-1} \in C_G(z) \leq B$. Следовательно, $c = bi$, где $b \in B$, $h = h^c = h^{bi}$, $h^i = h^b$. В частности, $E = \langle h^i, h \rangle \leq B$. Так как $E^i = E$, инволюция i нормализует единственную силовскую 2-подгруппу E_2 группы E , и если $E_2 \neq 1$, то $S \cap (E_2 \langle i \rangle) = E_2 \langle i \rangle$ согласно лемме 8, $i \in S$ и $c = b_i \in B$, противоречие. Отсюда $\langle h^i, h \rangle = \langle h \rangle$, и поскольку $h^b \in \langle h \rangle$ только в случае $h^b = h$, то $h^i = h^b = h$. Значит i централизует h .

Все инволюции группы G сопряжены, поэтому h является $\pi(H_1)$ -элементом и одновременно $\pi(H_0)$ -элементом. Это невозможно в силу леммы 11.

Лемма доказана.

Лемма 13. G насыщена $U_3(2^n)$.

Доказательство. Предположим обратное. Тогда в G найдется такая конечная подгруппа K , что $K \cong L_2(2^m)$ и $K \not\subset X$ ни для какой подгруппы X из G , такой что $X \cong U_3(2^k)$ (лемма 10).

Положим $B = S \rtimes H$, где S и H из леммы 11. Пусть $B_K = P_K \rtimes H_K$ – подгруппа Бореля из K . По лемме 9, 11 $B_K \subset B \rtimes H$. Следовательно $B_K \subset B_{K_1} = P_{K_1} \rtimes H_{K_2} \subset K_2 \cong U_3(2^e)$, где $P_{K_2} \rtimes H_{K_2}$ – подгруппа Бореля в K_2 . Возьмем в H_{K_2} элемент d нечетного простого порядка такой, что $d \in C_{K_1}(P_K \rtimes H_K)$ (предложение 2). В K_2 существует инволюция v такая, что $d^v = d$ и $h^v = h^{-1}$ для любого $h \in H_K$. В K существует инволюция t такая, что $h^t = h^{-1}$ для любого $h \in H_K$. Рассмотрим группу $\langle (\langle d \rangle \times \langle H_K \rangle), t \rangle = M$, по условию насыщенности $M \subset M_1 \cong L_2(2^m)$ или $M \subset M_1 \cong U_3(2^m)$. По лемме 12 $\langle d, d^t \rangle$ – конечная группа из $C_G(H_K)$. Следовательно, $\langle d, d^t \rangle \subset H$. Так как d – $\pi(H_1)$ -элемент, то $\langle d \rangle = \langle d^t \rangle$ (лемма 11).

Пусть $M_1 \cong L_2(2^m)$. Тогда $d^t = d^{-1}$, и можно рассмотреть группу $\langle (\langle d \rangle \times \langle H_K \rangle) \rtimes \langle t, v \rangle$, которая по условию насыщенности лежит в некоторой $K_2 \cong U_3(2^{m_2})$, но в $U_3(2^{m_2})$ такая ситуация невозможна (d – одновременно $\pi(H_1)$ -элемент и $\pi(H_0)$ -элемент).

Остается $M_1 \simeq U_3(2^m)$. Тогда $t \in N_{M_1}(H_K)$, и по предложению 9 $t \in N_{M_1}(\langle d \rangle \times H_1)$ и $\langle d \rangle^t = \langle d \rangle$. Поскольку t – инволюция, то либо $d^t = d$, либо $d^t = d^{-1}$. Последнее, как показывалось выше, невозможно. Следовательно $d^t = d$, и $\langle d, \langle t, B_K \rangle \rangle = \langle d \rangle \times K \subset M \simeq U_3(2^{m_3})$. Противоречие с выбором K .

Лемма доказана.

Завершим доказательство теоремы. По лемме 13 G насыщена группами из множества $\{U_3(2^n)\}$. Следовательно, G обладает периодической частью $T(G)$, которая изоморфна $U_3(Q)$ для подходящего локально конечного поля Q характеристики 2 (предложение 12).

4. Заключение

Доказано, что группа Шункова, насыщенная множеством групп вида $L_2(p^n)$, $U_3(2^n)$, обладает периодической частью $T(G)$, изоморфной либо $L_2(P)$, либо $U_3(Q)$, где P и Q – подходящие локально конечные поля.

Библиографические ссылки

1. Мазуров В. Д., Хухро Е. И. Коуровская тетрадь. Нерешенные вопросы теории групп / Институт математики СО РАН. Новосибирск. 2006. 193 с.
2. Череп А. А. О множестве элементов конечного порядка в бипрimitивно конечной группе // Алгебра и логика. 1987. № 4. С. 518–521.
3. Кузнецов А. А., Филиппов К. А. Группы, насыщенные заданным множеством групп // Сибирские электронные математические известия. 2011. Т. 8. С. 230–246.
4. Бусаркин В. М., Горчаков Ю. М. Конечные расщепляемые группы. М.: Наука. 1968. 113 с.
5. Каргаполов М. И., Мерзляков Ю. И. Основы теории групп. М.: Наука. 1982. 288 с.
6. Группы с условием насыщенности / А. А. Кузнецов [и др.] / КрасГАУ. Красноярск, 2010. 254 с.
7. Лыткина Д. В. Строение группы, порядки элементов которой не превосходят числа 4 // Сибирский математический журнал. 2007. № 2. С. 353–358.
8. Санов И. Н. Решение проблемы Бернсайда для показателя 4 // Ученые записки Ленинградского гос. ун-та. Сер. математическая. 1940, № 55. С. 166–170.
9. Беляев В. В. Локально конечные группы Шевалле // Исследования по теории групп / УНЦ АН СССР. 1984, С. 39–50.
10. Боровик А. В. Вложения конечных групп Шевалле и периодические линейные группы // Сибирский математический журнал. 1983. № 6. С. 26–35.
11. Hartley B., Shute G. Monomorphisms and direct limits of finite groups of Lie type // The Quarterly Journal of Mathematics Oxford. 1984. Ser. 2. 35, Vol. 137, P. 49–71.
12. Thomas S. The classification of the simple periodic linear groups // Arch. Math. 1983. P. 103–116.
13. Dichson L. Linear groups. Leipzig: B. G. Teubner, 1901. 312 p.
14. Шлёпкин А. К. Группы Шункова с дополнительными ограничениями / КГТУ. Красноярск, 1998. 187 с.
15. Дитсман А. П. О центре p -групп // Тр. семинара по теории групп. 1938. С. 30–34.
16. Шлёпкин А. К. О периодической части некоторых групп Шункова // Алгебра и логика. 1999. № 1. С. 96–125.
17. Рубашкин А. Г., Филиппов К. А. О периодических группах, насыщенных группами $L_2(p^n)$ // Сибирский математический журнал. 2005. № 6. С. 1388–1392.

References

1. Mazurov V. D., Huhro E. I. *Kourovskaya tetrad'. Nereshennye voprosy teorii grupp* [The Kourovka notebook. Unsolved problems in group theory]. Novosibirsk, Institut matematiki SO RAN Publ., 2006, 193 p.
2. Cherep A. A. [On the set of elements of finite order in a primitive finite group]. *Algebra i logika*. 1987, Vol. 4, P. 518–521 (In Russ.).
3. Kuznetsov A. A., Filippov K. A. [Group, saturated specified set of groups]. *Sibirskie elektronnye matematicheskie izvestiya*. 2011, Vol. 8, P. 230–246 (In Russ.).
4. Busarkin V. M., Gorchakov Ju. M. *Konechnye rassheplyaemye gruppy* [The final split of the group]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 113 p.
5. Kargapolov M. I., Merzlyakov Y. I. *Osnovy teorii grupp* [Fundamentals of group theory]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 288 p.
6. Kuznetsov A. A., Lytkina D. V., Tikhvatullin L. R., Filippov K. A. *Gruppy s usloviem nasyshtchennosti*. [Group with the condition of saturation]. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2010, 254 p.
7. Lytkina D. V. [The structure of the group the orders of whose elements do not exceed the number 4]. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal*, 2007, Vol. 2, P. 353–358 (In Russ.).
8. Sanov I. N. [The solution of the Burnside problem for exponent 4]. *Uchenye zapiski Leningradskogo gos. un-ta. Ser. matem.* 1940, Vol. 55, P. 166–170 (In Russ.).
9. Beljaev V. V. [Locally finite Chevalley groups]. *Sb. Issledovaniya po teorii grupp. UNC AN SSSR*. [Coll. Research on the theory of groups. UC USSR Academy of Sciences]. 1984, p. 39–50 (In Russ.).
10. Borovik A. V. [The attachment of finite Chevalley groups and periodic linear groups]. *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal*. 1983, Vol. 6, P. 26–35 (In Russ.).
11. Hartley B., Shute G. Monomorphisms and direct limits of finite groups of Lie type. *The Quarterly Journal of Mathematics Oxford*. 1984, Ser. 2. 35, Vol. 137, P. 49–71.
12. Thomas S. [The classification of the simple periodic linear groups]. *Arch. Math*, 1983, P. 103–116.
13. Dichson L. Linear groups. Leipzig: B. G. Teubner, 1901, 312 p.
14. Shlepkina A. K. *Gruppy Shunkova s dopolnitel'nyimi ogranicheniyami* [The Shunkov groups with additional restrictions]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 1998, 187 p.
15. Ditsman A. P. [On the center of the p -groups] *Tr. seminar po teorii grupp* [Tr. a seminar on the theory of groups]. 1938, P. 30–34 (In Russ.).
16. Shlepkina A. K. [About periodic part of some groups Shunkov]. *Algebra i logika*. 1999, Vol. 1, P. 96–125 (In Russ.).
17. Rubashkin A. G., Filippov K. A. [On periodic groups saturated with groups $L_2(p^n)$] *Sibirskiy matematicheskiy zhurnal*, 2005, Vol. 6, P. 1388–1392 (In Russ.).

ГРУППЫ ШУНКОВА

В. И. Сенашов

Институт вычислительного моделирования СО РАН
 Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
 Сибирский федеральный университет
 Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
 E-mail: sen1112home@mail.ru

Представлены результаты изучения класса сопряжено бипрimitивно конечных групп, получившего название групп Шункова. Условие конечности в таких группах накладывается на подгруппы, порожденные двумя сопряженными элементами в группе и ее сечениях по конечным подгруппам. Приводятся результаты, касающиеся групп Шункова. Показана связь класса групп Шункова с классами черниковских групп, групп Алёшина, почти слойно конечных групп, периодических групп. Доказываются два результата, устанавливающие свойства групп Шункова. Доказана замкнутость класса групп Шункова относительно взятия подгрупп и факторгрупп по конечным подгруппам. В. П. Шунков в своей первой теореме, посвященной классу групп Шункова, установил их связь с группами Черникова в классе примарных групп. Далее группы Шункова изучаются совместно с условием минимальности для абелевых подгрупп, с условием примарной минимальности и с различными условиями для систем подгрупп. В. П. Шунков установил существование бесконечной абелевой подгруппы в произвольной бесконечной группе Шункова. А. И. Созутов описал строение инвариантного множителя группы Шункова, являющейся группой Фробениуса и группа Шункова, составляющей с собственной подгруппой пару Фробениуса. Изучается строение периодических групп Шункова с черниковскими силовскими 2-подгруппами. Несколько авторов установили взаимосвязи групп Шункова с близкими классами групп. Доказано существование групп Шункова, не обладающих периодической частью. А. В. Рожков при помощи техники работы с автоморфизмами деревьев разделил между собой бесконечное множество классов подгрупп, обобщающих понятие группы Шункова, путем переноса условия конечности с подгрупп, порожденных двумя сопряженными элементами, на подгруппы, порожденные любыми ее n -сопряженными элементами. Результаты по группам Шункова с условием насыщенности, интенсивно изучаемые в последнее время, не вошли в данную работу, поскольку их можно найти в обзоре А. А. Кузнецова и К. А. Филиппова в «Сибирских электронных математических известиях». Результаты статьи найдут применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Ключевые слова: группа, инволюция, условие конечности, группа Шункова.

Vestnik SibGAU
 Vol. 16, No. 3, P. 618–623

SHUNKOV GROUPS

V. I. Senashov

Institute of Computational Modelling SB RAS
 50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 Siberian Federal University
 79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
 E-mail: sen1112home@mail.ru

The paper is devoted to the study of a class of conjugately biprimitively finite groups named as groups of Shunkov. Finiteness condition in such groups is superimposed on the subgroup generated by two conjugate elements of the group and group sections on finite subgroups. The paper presents results concerning groups of Shunkov. The relations between the class of groups of Shunkov with classes of groups of Chernikov, groups of Aleshin, almost layer-finite groups and periodic groups are shown. We have proven two results establishing the properties of groups of Shunkov. V. P. Shunkov in his first theorem dedicated to the class of groups of Shunkov established their connection with Chernikov groups in the class of primary groups. Further the groups of Shunkov together with the minimal condition for Abelian subgroups, with a primary minimality condition and with different conditions for systems of subgroups are studied. V. P. Shunkov establishes the existence of infinite Abelian subgroups in an arbitrary infinite Shunkov group. A. I. Sozutov described the structure of complement of group of Shunkov which is a Frobenius group or constituting

a Frobenius pair with a proper subgroup. The structure of periodic groups of Shunkov with Chernikov Sylow 2-subgroups was studied. Several authors have established relationships of Shunkov groups with similar classes of groups. The existence of Shunkov groups without periodic part was proved. A. V. Rozhkov using techniques for working with automorphisms of trees divided an infinite set of classes of subgroups, generalizing the concept of Shunkov group by transferring finiteness conditions from the subgroup generated by two elements conjugate to the subgroup generated by any of its n conjugate elements. The results on Shunkov groups with the condition of saturation have been intensively studied in recent years were not included in this work because they can be found in the review of A. A. Kuznetsov and K. A. Filippov in the Siberian Electronic Mathematical News. Our results will be used in the study of infinite groups with finiteness conditions.

Keywords: group, involution, finiteness condition, group of Shunkov.

Введение. Под условием конечности в теории групп понимается любое такое свойство, присущее всем конечным группам, что существует хотя бы одна бесконечная группа, которая этим свойством не обладает [1]. Примерами свойств такого рода являются локальная конечность, локальная нормальность, конечность всех классов сопряженных элементов, конечность всех убывающих цепей подгрупп (условие минимальности для подгрупп) и многие другие свойства. Систематическое изучение групп с теми или иными условиями конечности началось в конце 30-х гг. XX в. и в значительной степени было связано с исследованием специальных групп и близких к ним локально разрешимых групп с условием минимальности для подгрупп С. Н. Черниковым [2; 3] в 1939, 1940 гг.

Владимир Петрович Шунков уже десять лет назад указал на связь теории групп с космической отраслью. Как будто предчувствуя заказ на эту связь его теории с космосом, в 2005 г. он написал работу «Теория групп и космос» [4]. В работе 1970 г. [5] В. П. Шунков использует термин «бипрimitивно конечные группы» для класса групп, ставших в настоящее время классом групп Шункова, но только для периодических групп, и сечения берутся по экстремальным (черниковским) подгруппам.

Определение. Пусть G – периодическая группа, p – некоторое простое число, удовлетворяющее условию: если H подгруппа из G , N – инвариантная экстремальная подгруппа в H , то в фактор-группе H/N любые два элемента порядка p порождают конечную подгруппу. Тогда G назовем *бипрimitивно конечной относительно p* .

Если G бипрimitивно конечна относительно любого $p \in \pi(G)$, то группа G в 1970 г. называлась *бипрimitивно конечной*.

В дальнейшем понятие совершенствовалось, и в окончательном виде, который используется и теперь, закрепилось следующее определение.

Определение. Группа G называется *сопряженно q -бипрimitивно конечной*, если для любой ее конечной подгруппы H в фактор-группе $N_G(H)/H$ любая пара сопряженных элементов порядка q порождает конечную подгруппу.

В частности, любая периодическая группа сопряженно 2-бипрimitивно конечна.

Если группа G является сопряженно q -бипрimitивно конечной относительно любого простого числа

$q \in \pi(G)$, то G называется сопряженно бипрimitивно конечной группой.

В это же время были введены условия.

Определение. Группа называется *слабо q -бипрimitивно конечной*, если ее два любых элемента простого порядка порождают конечную подгруппу.

Определение. Группа называется *слабо бипрimitивно конечной*, если ее два любых элемента простого порядка порождают конечную подгруппу.

Определение. Группа называется *слабо q -сопряженно бипрimitивно конечной*, если ее два любых элемента простого порядка q , сопряженных между собой, порождают конечную подгруппу.

Определение. Группа называется *слабо сопряженно бипрimitивно конечной*, если ее два любых элемента простого порядка, сопряженных между собой, порождают конечную подгруппу.

Понятие сопряженно бипрimitивно конечной группы в последнем варианте введено Владимиром Петровичем Шунковым в 1975 г. в тезисах доклада на Всесоюзном алгебраическом симпозиуме. Ссылка на этот факт имеется в работе А. Н. Остыловского [6].

Намек на появление нового термина для класса сопряженно бипрimitивно конечных групп сделал сам В. П. Шунков. Когда в 1975 г. Д. И. Зайцев высказал мысль о громоздком названии этого класса групп, Владимир Петрович ответил в шутку: «Так назовите их группами Шункова». Но тогда этот класс еще не получил достаточного применения и использовался только в работах автора и трех его учеников.

В 80-е годы XX в. ситуация сильно изменилась: класс сопряженно бипрimitивно конечных групп упоминался уже во многих докладах на международных конференциях, десятки ученых посвящали этому классу групп свои статьи, защищались диссертации. И уже на заседании диссертационного совета официально отметили, что пора бы подумать о более приемлемом названии для широко используемых групп.

В самом начале XXI в. В. Д. Мазуров предложил назвать сопряженно бипрimitивно конечные группы группами Шункова. И постепенно, то в одной статье, то в другой термин заменялся на новый. И теперь уже трудно встретить старый термин, а термин «группы Шункова» стал таким же естественным, как термин «группы Черникова».

Определение. Группа называется *группой Шункова*, если для любой ее конечной подгруппы H в фактор-группе $N_G(H)/H$ любые два сопряженных элемента простого порядка порождают конечную подгруппу.

В настоящее время группы Шункова встречаются в работах А. А. Дуж, Л. Гамуди, В. О. Гомера, М. Н. Ивко, А. Н. Измайлова, Ал. Н. Остыловского, А. Н. Остыловского, И. И. Павлюка, А. М. Попова, А. В. Рожкова, А. Г. Рубашкина, Е. И. Седовой, В. И. Сенашова, А. И. Созутова, Н. Г. Сучковой, А. В. Тимофеевко, Г. А. Трояковой, К. А. Филиппова, А. А. Черепина, Н. С. Черникова, А. А. Шафиро, А. К. Шлепкина, В. П. Шункова.

Результаты по группам Шункова. Первым результатом В. П. Шункова, касающимся класса бипримитивно конечных групп, является следующая теорема.

Теорема 1 (В. П. Шунков [5]). Если в бипримитивно конечной p -группе централизатор некоторого элемента простого порядка – экстремальная группа, то сама группа экстремальна.

Напомним, что экстремальным называлась во время написания статьи В. П. Шункова конечное расширение абелевой группы с условием минимальности для подгрупп (в дальнейшем эти группы получили название черниковских или групп Черникова).

Теорема 2 (В. П. Шунков [5]). Если бипримитивно конечная p -группа (а при $p = 2$ произвольная 2-группа) обладает конечной максимальной элементарной абелевой подгруппой, то группа экстремальна.

Следствие (В. П. Шунков [5]). Если бипримитивно конечная p -группа (а при $p = 2$ произвольная 2-группа) удовлетворяет условию минимальности для абелевых подгрупп, то она экстремальна.

Теорема 3 (В. П. Шунков [7]). Бесконечная бипримитивно конечная группа содержит собственную бесконечную абелеву подгруппу.

Теорема 4 (А. И. Созутов, В. П. Шунков [8]). Бипримитивно конечная группа, у которой все собственные бесконечные подгруппы абелевы, локально конечна.

Отметим один результат М. В. Носкова, обобщающий предыдущую теорему А. И. Созутова и В. П. Шункова.

Теорема 5 (М. В. Носков [9]). Бипримитивно конечная группа G с собственными бесконечными подгруппами нильпотентности класса ≤ 2 локально конечна.

Чтобы множество групп считалось классом групп, необходима замкнутость его относительно взятия подгрупп и фактор-групп. Докажем две теоремы в этом направлении:

Теорема 6. Класс групп Шункова замкнут относительно взятия подгрупп.

Доказательство. Пусть H – подгруппа группы Шункова G . В группе H подгруппы, порожденные сопряженными элементами простого порядка, являются подгруппами группы G , поэтому они конечны. В фактор-группе $N_H(K)/K$ по конечной подгруппе K подгруппы, порожденные двумя сопряженными элементами простого порядка, являются подгруппами группы $N_G(K)/K$, поэтому также конечны по определению группы Шункова. Следовательно, группа H является группой Шункова. Теорема доказана.

Теорема 7. Класс групп Шункова замкнут относительно взятия фактор-групп по конечным группам.

Доказательство. Пусть K – конечная нормальная подгруппа группы Шункова G . В фактор-группе $\bar{G} = G/K$ подгруппы, порожденные сопряженными элементами простого порядка, конечны по определению группы Шункова.

В фактор-группе $N_{\bar{G}}(\bar{H})/\bar{H}$ по конечной подгруппе $\bar{H}$ группы $\bar{G}$ рассмотрим два сопряженных элемента простого порядка a, a^g . Поскольку они нормализуют подгруппу K , то их образы b, b^g в фактор-группе $N_G(HK)/HK$, очевидно, имеют простой порядок и сопряжены по теореме 4.2.1 из [10]. Группа $\langle b, b^g \rangle$ конечна по определению группы Шункова, тогда и группа $\langle a, a^g \rangle$ также конечна, поскольку ее полный прообраз содержится в конечном полном прообразе группы $\langle b, b^g \rangle$ в группе G . Теорема доказана.

Теорема 8 (А. Н. Остыловский, В. П. Шунков [11]). Пусть G – q -бипримитивно конечная группа со слабым условием минимальности для абелевых q -подгрупп. Если в централизаторе любого нецентрального q -элемента силовские q -подгруппы сопряжены, то и в G силовские q -подгруппы сопряжены.

В работе [11] А. Н. Остыловский и В. П. Шунков доказали, что в q -бипримитивно конечной группе со слабым условием минимальности силовские q -подгруппы сопряжены. В этой же работе ими для периодической бипримитивно конечной группы доказана эквивалентность слабого условия минимальности и условия минимальности.

В следующей теореме группа Шункова и группа Черникова связываются в классе групп без элементов второго порядка через условие минимальности для абелевых подгрупп.

Теорема 9 (А. Н. Остыловский, В. П. Шунков [11; 12]). Сопряженно бипримитивно конечная группа, не содержащая инволюций и удовлетворяющая условию минимальности для абелевых подгрупп, является разрешимой черниковской.

А. И. Созутов доказал существование m -порожденных бесконечных слабо бипримитивно конечных групп Фробениуса для $m \geq 2$ четного периода nq такого, что $n/2 \geq 665$, q – простое число, взаимно простое с n [13].

Приведем ряд результатов А. И. Созутова, характеризующих группы Шункова и близкий к ним класс групп слабо сопряжено бипримитивно конечных групп и бипримитивно конечных групп (включающих в себя группы Шункова).

Теорема 10 (А. И. Созутов [13; 14]). Слабо сопряженно бипримитивно конечная группа тогда и только тогда изоморфно вложима в группу регулярных автоморфизмов абелевой группы, когда все ее элементы простых порядков порождают локально конечную подгруппу T одного из типов:

- 1) T – локально циклическая группа;
- 2) $T = C \times S$, где $S \cong SL_2(3)$, C – локально циклическая $\{2,3\}$ -группа;
- 3) $T = C \times S$, $S \cong SL_2(5)$, C – локально циклическая $\{2,3,5\}$ -группа.

Теорема 11 (А. И. Созутов [13; 14]). В инвариантном множителе H слабо бипримитивно конечной группы Фробениуса элементы простых порядков порождают подгруппу типов 1–3 предыдущей теоремы.

Теорема 12 (А. И. Созутов [13; 14]). Пусть G – группа Шункова, H – ее собственная подгруппа, содержащая неединичный элемент конечного порядка, и (G, H) – пара Фробениуса. Тогда G обладает периодической частью T , являющейся группой Фробениуса с локально конечным инвариантным множителем $H \cap T$.

Теорема 13 (А. И. Созутов [13; 14]). Инвариантный множитель бипримитивно конечной группы Фробениуса обладает локально конечной периодической частью, изоморфно вложимой в группу регулярных автоморфизмов абелевой группы.

В. П. Шунков в 2003 г. охарактеризовал почти слойно конечные группы в классе локально конечных групп.

Теорема 14 (В. П. Шунков [15]). Локально конечная группа G тогда и только тогда почти слойно конечна, когда в G выполняется условие: нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы из G – почти слойно конечная группа.

Из этой теоремы В. П. Шункова берут начало характеристики почти слойно конечных групп в классе групп Шункова. Приведем одну из таких характеристик.

Теорема 15 (В. И. Сенашов [16; 17]). Пусть группа Шункова G содержит сильно вложенную подгруппу, обладающую почти слойно конечной периодической частью. Если в G нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью, то и сама группа G обладает почти слойно конечной периодической частью.

Следующая теорема устанавливает строение бесконечной силовской 2-подгруппы в группах Шункова, не обладающих почти слойно конечной периодической частью, при условии, что нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью.

Теорема 16 (В. И. Сенашов [18]). Пусть в группе Шункова G , не обладающей почти слойно конечной периодической частью, нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью. Если некоторая силовская 2-подгруппа группы G бесконечна, то она является расширением квазциклической 2-группы при помощи обращающего автоморфизма.

Взаимоотношения класса почти слойно конечных групп с близкими классами групп установлены автором в [19].

Приведем результат Н. С. Черникова, устанавливающий связь между классами групп Шункова и Черникова.

Теорема 17 (Н. С. Черников [20]). Периодическая группа Шункова с условием минимальности для неабелевых подгрупп – черниковская.

А. К. Шлёпкин получил свойства групп Шункова с условием примарной минимальности.

Теорема 18 (А. К. Шлёпкин [21]). Группа Шункова с условием примарной минимальности обладает локально конечной периодической частью.

Теорема 19 (А. К. Шлёпкин [21]). Периодическая группа Шункова с условием примарной минимальности локально конечна и почти локально разрешима.

Н. Г. Сучкова совместно с В. П. Шунковым описывала группы Шункова с условием минимальности для абелевых подгрупп.

Теорема 20 (Н. Г. Сучкова, В. П. Шунков [22]). Всякая сопряженно бипримитивно конечная группа, удовлетворяющая условию минимальности для абелевых подгрупп, является черниковской.

Теорема 21 (Н. Г. Сучкова, В. П. Шунков [23]). Пусть G – сопряженно бипримитивно конечная группа, содержащая инволюции, и $C_G(i)$ – периодическая подгруппа для любой инволюции i . Если в группе G любая локально конечная подгруппа с инволюциями удовлетворяет минимальности для абелевых подгрупп, то G – черниковская группа.

Теорема 22 (Н. Г. Сучкова, В. П. Шунков [24]). Пусть i – автоморфизм порядка 2 периодической сопряженно бипримитивно конечной группы T без инволюций. Если в T все i -допустимые локально конечные подгруппы удовлетворяют условию минимальности для абелевых подгрупп, то T – черниковская группа.

Г. А. Троякова изучала строение периодических групп Шункова с черниковскими силовскими 2-подгруппами.

Теорема 23 (Г. А. Троякова [25]). Пусть G – бесконечная периодическая сопряженно бипримитивно конечная группа с условием: любая локально конечная подгруппа из G либо черниковская, либо локально нильпотентна. Если силовские 2-подгруппы из G – черниковские, то группа G либо черниковская, либо $G/Z(G)$ разлагается в прямое произведение силовских подгрупп.

М. Ю. Бахова в [26] установила существование бипримитивно конечной, но не бинарно конечной группы. А. А. Череп в [27] доказал, что существует бипримитивно конечная группа, не обладающая периодической частью, и в [28] он доказал, что для любого простого числа p существует бипримитивно конечная группа G такая, что $\pi(G) = \{p\}$ и множество периодических элементов группы G не составляет подгруппу – ее периодическую часть.

Отметим, что А. А. Череп в [28] установил существование бипримитивно конечной группы G , обладающей нормальной элементарной абелевой подгруппой B такой, что фактор-группа G/B не является даже слабо сопряженно бипримитивно конечной. В то же время в этой же работе показано, что разрешимая сопряженно бипримитивно конечная группа бипримитивно конечна.

То, что некоторые группы Алёшина не являются группами Шункова, установил А. В. Тимофеев.

Теорема 24 (А. В. Тимофеев [29]). Для любого простого числа p и каждого $r \geq 2$ существует несопряженно бипримитивно конечная финитно аппроксимируемая r -порожденная p -группа.

Недавно им совместно К. Гуптой удалось установить, какие из групп Голода являются группами Шункова, а какие нет.

Напомним, что группа называется *сопряженно n -конечной*, если любые ее n сопряженных элементов порождают конечную подгруппу. В следующей теореме устанавливается связь между классами сопряженно k -конечных групп и n -конечных групп для натуральных чисел n и k .

Теорема 25 (А. В. Рожков [30]). Пусть p – простое число, $1 \leq n \leq k$ – натуральные числа. Тогда существует конечно порожденная финитно аппроксимируемая сопряженно k -конечная, n -конечная, но не $(n+1)$ -конечная p -группа. В частности, p -группа может быть не бинарно конечной, но сопряженно k -конечной, где k сколь угодно велико.

Группы Шункова с условием насыщенности в последнее время интенсивно изучаются в работах А. А. Дуж, А. А. Кузнецова, А. Г. Рубашкина, К. А. Филиппова, А. К. Шлепкина. С результатами этих авторов в данном направлении можно познакомиться в обзоре [31].

Заключение. Класс групп Шункова уже достаточно давно получил признание у специалистов по теории групп. Эта работа является первой работой, посвященной обзору результатов, касающихся групп Шункова. Показана связь класса групп Шункова с классами групп Черникова, групп Алёшина, почти слойно конечных групп, периодических групп. Результаты статьи найдут применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Сибирского федерального университета (проект «Алгебро-логические структуры и комплексный анализ»).

Acknowledgments. This work was supported by the grant of the Siberian Federal University (Project – Algebra-logical structures and complex analysis).

Библиографические ссылки

1. Черников С. Н. Условия конечности в общей теории групп // Успехи мат. наук. 1959. Т. 14, № 5. С. 45–96.
2. Черников С. Н. Бесконечные специальные группы // Мат. сб. 1939. № 6. С. 199–214.
3. Черников С. Н. О группах с силовским множеством // Мат. сб. 1940. № 8. С. 377–394.
4. Шунков В. П. Теория групп и космос : препринт № 1. Красноярск : ИВМ СО РАН, 2005. 16 с.
5. Шунков В. П. Об одном классе p -групп // Алгебра и логика. 1970. Т. 9, № 4. С. 484–486.
6. Остыловский А. Н. Локальная конечность некоторых групп с условием минимальности для абелевых подгрупп // Алгебра и логика. 1977. Т. 16, № 1. С. 63–73.
7. Шунков В. П. Об абелевых подгруппах бипрimitивно конечных групп // Алгебра и логика. 1973. Т. 12, № 5. С. 603–614.
8. Созутов А. И., Шунков В. П. Об одном обобщении теоремы Фробениуса на бесконечные группы // Мат. сб. 1976. Т. 100, № 4. С. 495–506.
9. Носков М. В. О локальной конечности одного класса бипрimitивно конечных групп // Исследования по теории групп / Ин-т физики СО РАН СССР. Красноярск, 1975. С. 24–31.
10. Каргаполов М. И., Мерзляков Ю. И. Основы теории групп. 4-е изд. М. : Наука, 1996. 288 с.
11. Остыловский А. Н., Шунков В. П. О q -бипрimitивно конечных группах с условием минимальности для q -подгрупп // Алгебра и логика. 1973. Т. 14, № 1. С. 61–78.
12. Остыловский А. Н., Шунков В. П. О локальной конечности одного класса групп с условием минимальности // Исследования по теории групп / Ин-т физики СО РАН СССР. Красноярск, 1975. С. 32–48.
13. Созутов А. И. О строении неинвариантного множителя в некоторых группах Фробениуса // Сиб. мат. журн. 1994. Т. 35, № 4. С. 893–901.
14. Попов А. М., Созутов А. И., Шунков В. П. Группы с системами фробениусовых подгрупп. Красноярск : Изд-во КГТУ. 2004. 210 с.
15. Сенашов В. И., Шунков В. П. Почти слойная конечность периодической части группы без инволюций // Дискретная математика. 2003. Т. 15, № 3. С. 91–104.
16. Сенашов В. И. О группах Шункова с сильно вложенной почти слойно конечной подгруппой // Труды ИММ УрО РАН. Т. 16, № 3. 2010. С. 234–239.
17. Сенашов В. И. О группах с сильно вложенной подгруппой, обладающей почти слойно конечной периодической частью // Укр. мат. журн. 2012. Т. 64, № 3. С. 384–391.
18. Сенашов В. И. Структура бесконечной силовой подгруппы в некоторых группах Шункова // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 74–79.
19. Сенашов В. И. Взаимоотношения почти слойно конечных групп с близкими классами // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 76–79.
20. Черников Н. С. Группы с условиями минимальности // Фундаментальная и прикладная математика. 2008. Т. 14, № 5. С. 219–235.
21. Шлепкин А. К. О сопряженно бипрimitивно конечных группах с условием примарной минимальности // Алгебра и логика. 1983. Т. 22, № 2. С. 226–231.
22. Сучкова Н. Г., Шунков В. П. О группах с условием минимальности для абелевых подгрупп // Алгебра и логика. 1986. Т. 25, № 4. С. 445–469.
23. Сучкова Н. Г. О некоторых сопряженно бипрimitивно конечных группах. Красноярск, 1987, 21 с. Деп. в ВИНТИ. 09.09.87, № 6627-B-87.
24. Сучкова Н. Г. О сопряженно бипрimitивно конечных группах с условием минимальности для некоторых абелевых подгрупп. Красноярск, 1989. 19 с. Деп. в ВИНТИ. 11.05.89, № 3063-B-89.
25. Троякова Г. А. К теории черниковских групп // Тр. Ин-та математики АН Украины. Киев. 1993. С. 34–37.
26. Бахова М. Ю. Примеры бипрimitивно конечных групп без инволюций // Тез. докл. 17 Всесоюз. алгебраич. конф. Минск, 1983. С. 17.
27. Череп А. А. О множестве элементов конечного порядка в бипрimitивно конечной группе // Алгебра и логика. 1987. Т. 26, № 4. С. 518–521.
28. Череп А. А. Группы с (a, b) -условием конечности : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск. 1993. 53 с.
29. Тимофеев А. В. О 2-порожденных p -группах Голода // Алгебра и логика. 1985. Т. 24, № 2. С. 211–225.

30. Рожков А. В. Условия конечности в группах автоморфизмов деревьев // Алгебра и логика. 1998. Т. 37, № 5. С. 568–605.

31. Кузнецов А. А., Филиппов К. А. Группы, насыщенные заданным множеством групп // Сибирские электронные математические известия. 2011. Т. 8. С. 230–246.

References

1. Chernikov S. N. [Finiteness conditions in the general theory of groups]. *Uspekhi mat. nauk.* 1959, Vol. 14, No. 5, P. 45–96 (In Russ.).

2. Chernikov S. N. [Infinite special groups]. *Mat. Sbornik.* 1939, No. 6, P. 199–214 (In Russ.).

3. Chernikov S. N. [On groups with Sylow set]. *Mat. Sbornik.* 1940, No. 8, P. 377–394 (In Russ.).

4. Shunkov V. P. [Group theory and space]. *Preprint № 1. Krasnoyarsk : ICM SB RAS*, 2005, 16 p.

5. Shunkov V. P. [On a class of p -groups]. *Algebra i logika*, 1970, Vol. 9, No. 4, P. 484–486 (In Russ.).

6. Ostylovsky A. N. [Local finiteness of some groups with minimal condition for Abelian subgroups]. *Algebra i logika*, 1977, Vol. 16, no 1, P. 63–73. (In Russ.).

7. Shunkov V. P. [On Abelian subgroups of biprimatively finite groups]. *Algebra i logika*, 1973, Vol. 12, No. 5, P. 603–614 (In Russ.).

8. Sozutov A. I., Shunkov V. P. [On a generalization of Frobenius' theorem to infinite groups]. *Mat. Sbornik.* 1976, Vol. 100, No. 4, P. 495–506 (In Russ.).

9. Noskov M. V. [On local finiteness of one class of biprimatively finite groups]. *V sb. "Issledovaniya po teorii grupp"*. [In Proc. "Studies in the theory of groups"]. Krasnoyarsk, Institute of Physics of SB AS USSR Publ., 1975, P. 24–31.

10. Kargapolov M. I., Merzlyakov Y. I. *Osnovy teorii grupp. 4-ye izd.* [Foundations of the theory of groups]. 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1996, 288 p.

11. Ostylovsky A. N., Shunkov V. P. [On a biprimatively q -finite groups with minimal condition for q -subgroups]. *Algebra i logika*, 1973, Vol. 14, No 1, P. 61–78 (In Russ.).

12. Ostylovsky A. N., Shunkov V. P. [On local finiteness of one class of groups with minimal condition]. *V sb. "Issledovaniya po teorii grupp"*. [In Proc. "Studies in the theory of groups"]. Krasnoyarsk, Institute of Physics of SB AS USSR Publ., 1975, p. 32–48.

13. Sozutov A. I. [On the structure of non-invariant factor in some Frobenius groups]. *Sib. mat. Zh.* 1994, Vol. 35, No 4, P. 893–901 (In Russ.).

14. Popov A. M., Sozutov A. I., Shunkov V. P. *Gruppy s sistemami frobeniusovykh podgrupp* [Groups with systems of Frobenius subgroups]. Krasnoyarsk, KSTU Publ., 2004, 210 p.

15. Senashov V. I., Shunkov V. P. [Almost layer-finiteness of the periodic part of a group without involutions]. *Diskretnaya matematika.* 2003, Vol. 15, No. 3, P. 91–104 (In Russ.).

16. Senashov V. I. [On Shunkov groups with a strongly embedded almost layer-finite subgroup]. *Trudy*

IMM UrO RAN. 2010, Vol. 16, No. 3, P. 234–239 (In Russ.).

17. Senashov V. I. [On groups with a strongly embedded subgroup with an almost layer-finite periodic part]. *Ukrain. math. zhurn.* 2012, Vol. 64, No. 3, P. 384–391.

18. Senashov V. I. [Structure of an infinite Sylow subgroup in some Shunkov groups]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 1 (47), P. 74–79 (In Russ.).

19. Senashov V. I. [Relationship of almost layer-finite groups with similar classes]. *Vestnik SibGAU.* 2014, No. 1 (53), P. 76–79 (In Russ.).

20. Chernikov N. S. [Groups with minimal conditions]. *Fundamental'naya i prikl. matematika.* 2008, Vol. 14, No. 5, P. 219–235 (In Russ.).

21. Shlepkov A. K. [On conjugate biprimatively finite groups with a primary minimality condition]. *Algebra i logika*, 1983, Vol. 22, No. 2, P. 226–231 (In Russ.).

22. Suchkova N. G., Shunkov V. P. [On groups with minimal condition for Abelian subgroups]. *Algebra i logika*, 1986, Vol. 25, No. 4, P. 445–469 (In Russ.).

23. Suchkova N. G. *O nekotorykh sopryazhenno biprimativno konechnykh gruppakh* [On some conjugately biprimatively finite groups]. Krasnoyarsk, 1987, 21 p. *Manuscript Dep. VINITI.* 9.9.87, N6627-B-87.

24. Suchkova N. G. *O sopryazhenno biprimativno konechnykh gruppakh s usloviem minimal'nosti dlya nekotorykh abelevykh podgrupp* [On conjugate biprimatively finite groups with minimal condition for some Abelian subgroups]. Krasnoyarsk, 1989. 19 p. *Manuscript Dep. VINITI.* 11.05.89, N3063-B-89.

25. Troyakova G. A. [To the theory of Chernikov groups]. *Tr. in-ta matematiki AN Ukrainy.* [Proc. of Institute of Mathematics, Academy of Sciences of Ukraine]. Kiev, 1993, P. 34–37.

26. Bakhova M. Yu. [Examples of biprimatively finite groups without involutions]. *Tez. dokl. 17 Vsesoyuzn. algebraich. konf.* [Abstracts of 17 All-Union algebraic. Conf.]. Minsk, 1983, P. 17.

27. Cherep A. A. [On the set of elements of finite order in biprimatively finite groups]. *Algebra i logika*, 1987, Vol. 26, No 4, P. 518–521 (In Russ.).

28. Cherep A. A. *Gruppy s (a,b) -usloviem konechnosti.* *Diss. Cand. Phys.-Mat. Sciences.* [Groups with (a, b) -finiteness condition. Diss. Cand. Physics-mathematics sciences]. Krasnoyarsk, 1993.

29. Timofeenko A. V. [On 2-generated p -groups of Golod]. *Algebra i logika*, 1985, Vol. 24, No. 2, P. 211–225 (In Russ.).

30. Rozhkov A. V. [Finiteness conditions in automorphism groups of trees]. *Algebra i logika*, 1998, Vol. 37, No. 5, P. 568–605 (In Russ.).

31. Kuznetsov A. A., Filippov K. A. [Groups saturated by a given set of groups]. *Sibirskie elektronnye matematicheskie izvestiya.* 2011, Vol. 8, P. 230–246 (In Russ.).

МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ТУНГУССКИХ СОБЫТИЙ 1908 ГОДА

В. В. Шайдуров

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
E-mail: shaidurov04@mail.ru

Предлагается новое объяснение геомагнитного эффекта, зарегистрированного магнитографами Иркутской обсерватории во время тунгусской катастрофы 1908 года. Эффект состоял в локальном возмущении геомагнитного поля, начавшемся через две с половиной минуты после основного взрыва в эпицентре тунгусских событий в бассейне реки Подкаменная Тунгуска Красноярского края. Возмущение продолжалось 6 часов и носило немонотонный характер. К настоящему времени выдвинуто несколько гипотез для объяснения этого эффекта. Но большая часть этих гипотез не согласуется с другими данными, а остальные пока не подтверждены количественными показателями или модельными расчетами. Излагаемое здесь объяснение основано на установленном факте распыления в атмосфере микрочастиц и субмикронных вкраплений железа и его окислов в результате абляции и взрыва как главной части тунгусского космического тела, так и его других фрагментов. При остывании этих микрочастиц и вкраплений ниже определенной температуры (называемой точкой Кюри) в магнитном поле Земли за счет хорошо изученного эффекта термонамагничивания они получили значительный удельный магнитный момент. После этого они двигались с учетом взаимодействия с магнитным полем Земли, преимущественно вдоль магнитных силовых линий. В результате осаждения они образовали зоны повышенной намагниченности и повышенной магнитной восприимчивости почв в районе тунгусской катастрофы. Эти зоны тщательно выделены А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас в ходе палеомагнитных исследований рыхлых осадочных пород района тунгусской катастрофы. Причем они существенно отличаются от зон повышенного выпадения других немагнитных материалов. Более того, геометрический анализ зон выпадения магнитных материалов позволяет оценить наклон траектории главного космического тела. Эта оценка в сочетании с другими данными дает довольно большой угол входа тунгусского космического тела к поверхности Земли – около 76°. Такая величина угла находится в согласии с результатами современного математического моделирования высоты взрыва главного тунгусского космического тела.

Ключевые слова: тунгусское космическое тело, микрочастицы и субмикронные вкрапления железа и его окислов, термонамагниченность, палеомагнитные свойства почвы.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 624–631**THE MAGNETIC EFFECTS OF THE TUNGUSKA EVENTS IN 1908**

V. V. Shaydurov

Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: shaidurov04@mail.ru

In the paper a new explanation for the magnetic effect registered by magnetographs of the Irkutsk Observatory during the Tunguska catastrophe in 1908 is presented. The effect was due to a local perturbation of the geomagnetic field, which began two and a half minutes after the main explosion at the epicenter of the Tunguska event in the basin of the Podkamennaya Tunguska River in Krasnoyarsk Region. The disturbance lasted for 6 hours and had a non-monotonic behavior. By now, several hypotheses have been proposed to explain this effect. But the most part of them is not consistent with other data, and the others have been not yet confirmed by quantitative parameters or model computations. The present explanation is based on the established fact of the sputtering of microparticles and submicron inclusions of iron and its oxides in the atmosphere as a result of the ablation and the explosion of the main part of the Tunguska cosmic body and its other fragments. These microparticles and inclusions, when cooling below a certain temperature (called the Curie point) in the Earth's magnetic field due to the well-studied effect of termomagnetization, received a significant unit magnetic moment. After that they moved with regard to the interaction with the Earth's magnetic field, mainly along the magnetic field lines. In consequence of the deposition, they formed zones of high magnetization and high magnetic susceptibility of soils in the Tunguska catastrophe area. These zones were carefully marked out by

A. P. Boyarkina and S. D. Sidoras during the paleomagnetic studies of friable sediments in the Tunguska catastrophe area. Moreover, they differ significantly from the areas of increased deposition of other, non-magnetic materials. Furthermore, the geometrical analysis of deposition areas of magnetic materials admits estimating the trajectory slope of the main cosmic body. This estimation in combination with other data gives a quite large entrance angle of the Tunguska cosmic body to the surface of the Earth about 76° . This angle magnitude is in agreement with the results of the modern mathematical modeling of the explosion height of the main part of the Tunguska cosmic body.

Keywords: Tungus cosmic body, microparticles and submicronic inclusions of iron and its oxides, thermomagnetization, paleomagnetic properties of soil.

Введение. В течение нескольких минут после полуночи 30.06.1908 г. по гринвичскому времени Земля пересекла траекторию осколков разрушенного космического тела. Большая часть этих осколков сгорела, ионизировалась, взорвалась высоко в атмосфере, вызвав ряд воздушных и наземных эффектов [1–3].

Самые сильные наземные эффекты проявились в хорошо известной и основательно исследованной местности в бассейне реки Подкаменная Тунгуска Красноярского края с координатами «эпицентра» $60^\circ 53'$ с. ш. и $101^\circ 53'$ в. д., где произошло наибольшее поражение растительности и местности.

Поскольку эти события происходили недалеко от Иркутской магнитной обсерватории (~ 900 км), по сравнению с дистанциями до других обсерваторий, то в 1959 г. К. Г. Иванов провел тщательный осмотр магнитограмм, соответствующих этому событию [4]. В результате неожиданно обнаружилось геомагнитное явление, начавшееся через 2–3 минуты после взрыва и продолжавшееся 5–6 часов.

Тогда ученые запросили магнитограммы за период 25 июня – 5 июля 1908 г. во всех обсерваториях мира, функционировавших в 1908 г. 18 обсерваторий любезно прислали копии магнитограмм этого периода. Их анализ показал отсутствие отчетливо выраженных необычных геомагнитных эффектов. Лишь на магнитограммах Свердловской (Екатеринбургской) обсерватории, находящейся на расстоянии ~ 2000 км от эпицентра, обнаружались небольшие особенности, которые можно отнести к последствиям тунгусских событий с большой натяжкой [5; 6].

Таким образом, возмущение геомагнитного поля носило локально-региональный характер. Для более точного выявления этого эффекта из наблюдавшихся изменений компонент магнитного поля исключили суточную вариацию, зависящую главным образом от Солнца. Получившиеся графики приведены на рис. 1. Напомним, что H -компонента характеризует горизонтальную составляющую вектора магнитного поля, Z -компонента – вертикальную, а D -компонента – восточную составляющую.

Необычный эффект этих вариаций получил различные толкования, особенно по некоторой аналогии с геомагнитными эффектами, вызванными ядерными взрывами. Но при ядерных взрывах вызванные возмущения геомагнитного поля начинались с момента взрыва и продолжались максимум 2 часа. А при тунгусских событиях они начались через две с половиной минуты после взрыва и продолжались около 6 часов [7].

В научной литературе предложено несколько возможных механизмов, порождающих магнитный эффект при воздействии крупных космических тел на

атмосферу Земли [4–21]. Большая часть из них не выдержала проверки в случае тунгусских событий, но несколько механизмов не потеряли своей актуальности: возмущение системы ионосферных токов [4–6; 19–21], образование дипольного момента в плазменном следе [11], магнитное возмущение, вызванное ударной волной [11; 16], магнитогидродинамический эффект плюма, распространившегося вдоль траектории космического тела [8; 9]. Конечно, эти механизмы могут вносить свой вклад в магнитный эффект взаимодействия космических тел с атмосферой Земли и приводить к возмущению геомагнитного поля в своих пространственно-временных масштабах. Но некоторые противоречия и плохо объясняемые количественные характеристики в случае тунгусских событий не дают оснований считать один из этих механизмов в качестве основного, порождающего наблюдаемые вариации магнитного поля.

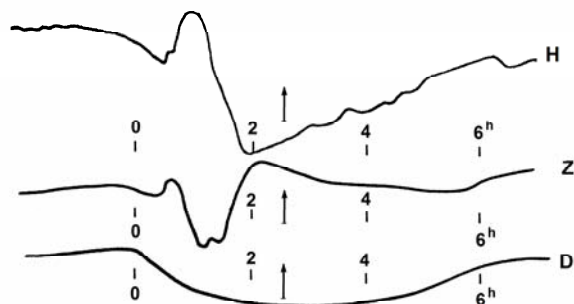


Рис. 1. Вариации геомагнитного поля, зафиксированные Иркутской обсерваторией (из статей К. Г. Иванова [4–6]): стрелки соответствуют амплитуде $10 \gamma = 10^{-4}$ эрстед = $0,00796$ А/м

Намагничивание частиц в магнитном поле Земли. Рассмотрим в качестве гипотезы другой магнитный эффект с простой физической основой. На сегодняшний день с большой достоверностью установлено наличие магнитных материалов в выпавших микрочастицах тунгусского космического тела [22–24]. Во время полета в атмосфере при абляции вещества с поверхности этого тела и его фрагментов срывались перегретые частицы, содержащие железо и его соединения. Отметим, что окислы железа, никеля, кобальта и их некоторые сплавы являются ферромагнетиками и обладают магнитными свойствами при температуре ниже своих точек Кюри [25]. В таблице приведены некоторые материалы и сплавы, обладающие такими свойствами, в порядке понижения их точек Кюри.

Отметим одно важное свойство ферромагнетиков, называемое термонамагниченностью и активно используемое в палеомагнитных исследованиях [26]. Для этих исследований, как и для наших рассуждений, наиболее существенна остаточная термонамагниченность, которая образуется при остывании материала в геомагнитном поле с начальной температурой выше точки Кюри Θ . Рост намагниченности при снижении температуры $T < \Theta$ идёт довольно интенсивно, но при достижении «блокирующей» температуры T_b рост резко замедляется и происходит «замораживание» приобретённой намагниченности. Термонамагниченность может в десятки и сотни раз превышать намагниченность, возникающую в том же поле при комнатной температуре. Для ее разрушения требуются магнитные поля, в десятки и сотни раз превышающие создавшее ее поле.

Точки Кюри некоторых магнитных материалов

Материал	Точка Кюри, К	Точка Кюри, °С
Co	1400	1127
Fe	1043	770
Fe ₂ O ₃	948	675
FeO Fe ₂ O ₃	858	585
NiO Fe ₂ O ₃	858	585
CuO Fe ₂ O ₃	728	455
MgO Fe ₂ O ₃	713	440
Ni	627	354
MnO Fe ₂ O ₃	573	300

Итак, в результате абляции и взрыва шло образование микрочастиц с содержанием железа, его окислов и сплавов. В результате снижения частиц в атмосфере железо и его сплавы частично могли окисляться, но вновь порождали ферромагнитные соединения. При остывании ниже точки Кюри эти частицы приобретали магнитный момент, направленный вдоль магнитной силовой линии Земли. Причем удельный магнитный момент может быть огромным у однодоменных частиц или вкраплений, насчитывающих несколько десятков тысяч молекул [25]. При отсутствии сильного ветра частицы с магнитным моментом после охлаждения ниже точки Кюри снижались уже под влиянием локального магнитного поля, преимущественно вдоль магнитных силовых линий.

Напомним, что в соответствии с нашей гипотезой, изложенной в [27], направление проекции траектории полета главного фрагмента тунгусского тела на поверхность Земли проходило с запада на восток по азимуту $\sim 276^\circ$.

Теперь приведем фрагмент карты модуля остаточной намагниченности (рис. 2) из работы [28] в районе катастрофы. Зона I соответствует максимальному модулю остаточной намагниченности, в среднем равному $143,7 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,01144 А/м.

В зоне II средняя величина модуля остаточной намагниченности равна $101,3 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,008061 А/м. В зоне III эта величина еще меньше: $94,7 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,007536 А/м. И наконец, самая большая зона IV соответствует образцам с остаточной намагниченностью $73,1 \cdot 10^{-6}$ эрстед = 0,005817 А/м. На рис. 2 нами проведена ось симметрии двух зон наиболее интен-

сивного модуля остаточной напряженности. Угол δ между ней и географической параллелью оказался равным 43° . В идеале эта ось является геометрическим местом математических ожиданий положения магнитных частиц, выпадающих с траектории движения тела вдоль магнитных силовых линий Земли. Объяснение, что частицы разнесены в этом направлении ветром после взрыва, не соответствует действительности. Установившаяся в это время погода была безветренной, что отмечали очевидцы этих событий [29; 30].

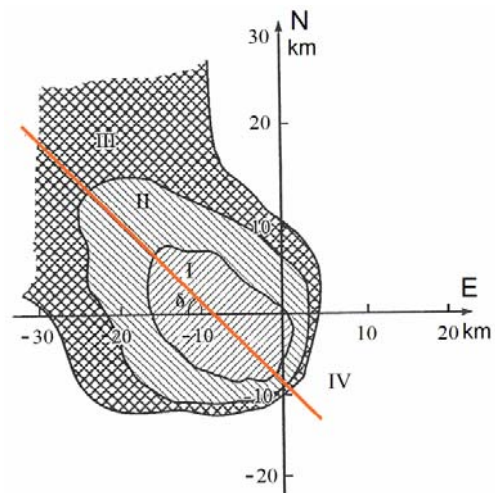


Рис. 2. Зоны вариации модуля остаточной намагниченности в районе тунгусской катастрофы из статьи А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас [28]

В районе тунгусской катастрофы наклонение вектора напряженности магнитного поля Земли было таково, что магнитные силовые линии уходили в земную поверхность с углом $\sim 77^\circ$ [31; 32]. А по геомагнитной модели сайта [32] в июне 1908 г. магнитное склонение в районе эпицентра тунгусской катастрофы составляло $\sim 6^\circ$, т. е. угол между северными направлениями географического меридиана и магнитной стрелки был равен 6° (в отсчете на восток, по часовой стрелке).

Покажем, что в рамках этой простой гипотезы можно оценить угол наклона траектории тела. Для этого рассмотрим чертеж на рис. 3. Оси ON, OE и Oh направлены вдоль восточного, северного и вертикального направлений координат. Сплошная линия АО соответствует траектории космического тела, пунктирная линия ВО является ее проекцией на горизонтальную плоскость. Нас интересует угол $\angle AOB$, обозначаемый через φ . Для простоты пренебрежем сферичностью поверхности Земли и рельефом местности. Пунктирная линия СО соответствует оси осадения магнитных частиц.

Итак, пусть частица, находящаяся в точке А, снижается вдоль силовой магнитной линии в точку С. Положим высоту [AB] равной l , тогда длина отрезка [BO] в прямоугольном треугольнике AOB равна $l/\operatorname{ctg} \varphi$. Теперь рассмотрим треугольник BOC. Угол между прямой ВО и осью OE равен 6° , а угол между

прямой CO и этой осью равен 43° . Так что угол $\angle BOC$ равен 37° . Направление линии BC и оси ON отличается на угол склонения 6° , поэтому угол $\angle CBO$ равен 102° . Оставшийся угол $\angle BCO$ равен 41° . По теореме синусов

$$[BC]/\sin \angle BOC = [BO]/\sin \angle BCO.$$

Отсюда

$$[BC] = l \operatorname{ctg} \varphi \sin 37^\circ / \sin 41^\circ.$$

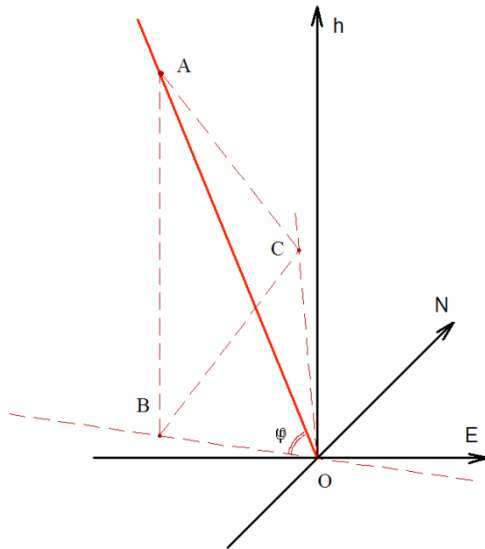


Рис. 3. Геометрическое расположение траектории космического тела AO , его проекции BO и оси выпадения магнитных частиц CO

Теперь рассмотрим прямоугольный треугольник ABC . Поскольку угол $\angle ACB$ совпадает с углом наклона, то он равен 77° . Поэтому

$$[AB] = [BC] \operatorname{tg} 77^\circ,$$

откуда

$$l = l \operatorname{tg} 77^\circ \operatorname{ctg} \varphi \sin 37^\circ / \sin 41^\circ.$$

В итоге

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} 77^\circ \sin 37^\circ / \sin 41^\circ = 3,9734,$$

что соответствует углу

$$\varphi = 76^\circ.$$

Таким образом, на основании этой гипотезы космическое тело вошло в атмосферу Земли по траектории, близкой к вертикальной. Эта оценка находится в согласии с выводами статьи [33] о высоте взрыва тунгусского космического тела.

Сопоставление аргументов и выводов с другими данными. Для опровержения влияния ветра в тропосфере на перенос частиц с магнитными свойствами рассмотрим рис. 4, демонстрирующий распределение другого металла – иридия. В рамках рассматриваемых температур после остывания частиц в воздухе иридий обладает парамагнитными, а не магнитными свойствами. Поэтому влияние магнитного поля на траекторию снижения частиц с его участием было ничтожным. В силу этого обстоятельства распределение иридия оказалось практически симметричным

относительно проекции траектории космического тела. При наличии ветра это распределение было бы другим.

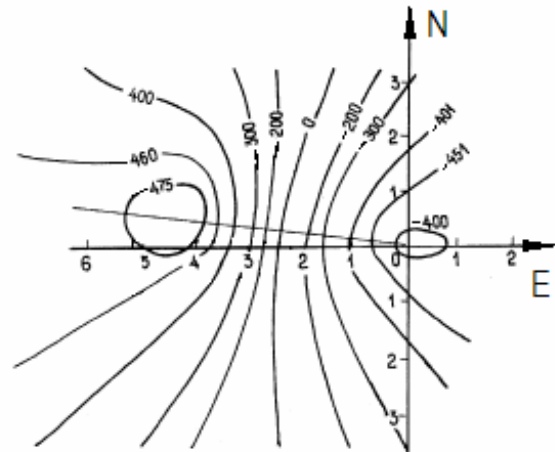


Рис. 4. Распределение иридия в почве, взятое из статьи В. К. Журавлева, Д. В. Демина [34]: здесь знак «+» соответствует уменьшению содержания иридия

Теперь рассмотрим другой фрагмент карты из статьи [28] (рис. 5). На нем изображены три зоны, существенно различающиеся магнитной восприимчивостью материала почвы. Зона I соответствует максимальному среднему коэффициенту магнитной восприимчивости, равному $3,175 \cdot 10^{-4}$. В зоне II этот коэффициент равен $2,246 \cdot 10^{-4}$. И наконец, зона III соответствует среднему коэффициенту магнитной восприимчивости $1,125 \cdot 10^{-4}$.

Сначала объясним источник различия между конфигурациями зон на рис. 4 и 5, порождаемых одним и тем же явлением. Главный источник коэффициента магнитной восприимчивости – малодоменные и особенно однодоменные частицы и вкрапления. С одной стороны, однодоменные частицы обладают огромной магнитной восприимчивостью порядка десятков и сотен тысяч. Поэтому микроскопическое содержание таких частиц в почве достаточно для получения осредненной по объему магнитной восприимчивости порядка 10^{-4} . Вместе с тем, эти частицы и вкрапления в среднем соответствовали субмиллиметровым и микронным размерам. Время снижения таких частиц продолжительнее [35] по сравнению с более крупными частицами, несущими основную остаточную термонамагниченность. За счет однодоменных частиц шлейф носителей повышенной магнитной восприимчивости растянулся и расширился. Поскольку такие частицы разбрасывались вдоль всей траектории полета тела, то они и разносились с соответствующих высот. Принимая во внимание отсутствие ветра в тропосфере, мы вновь должны получить оценку связи высоты и траектории снижения частиц. Это достигается следующим образом. Проведем среднюю линию начального участка зоны I, соответствующего тропосферному участку траектории. Угол между ней и географической параллелью снова равен 43° , что подтверждает рассуждения и выводы предыдущего раздела.

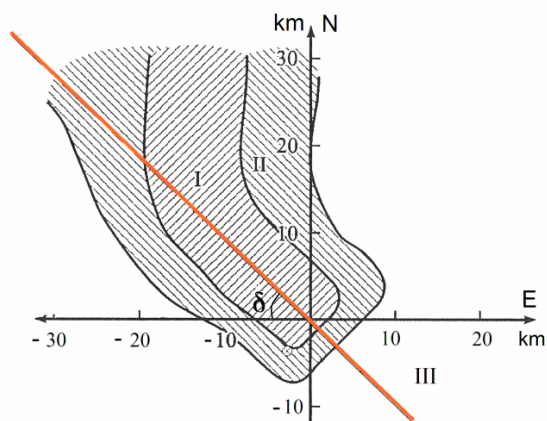


Рис. 5. Зоны вариации магнитной восприимчивости в районе тунгусской катастрофы из статьи А. П. Бояркиной и С. Д. Сидорас [28]

Имея в виду оценку угла наклона траектории в 76° , мы приходим к выводу, что поворот зоны I на север продиктован выпадением этих частиц из стратосферы. Дело в том, что в отличие от спокойной тропосферы в тот день [29], в стратосфере был обычный сезонный ветер с главным направлением с юга на север. Так что положение поворота зоны I косвенно подтверждает близкую к вертикальной траекторию полета космического тела.

Заключение. Итак, мы объяснили происхождение зарегистрированных магнитных эффектов термонамагниченностью микронных и субмикронных магнитных частиц и их вкраплений, состоящих из железа, его сплавов и окислов. Более того, учет силового взаимодействия таких частиц с магнитным полем Земли приводит к некоторой связи между траекторией основной части тунгусского космического тела и осями симметрии зон магнитной восприимчивости и остаточной напряженности магнитного поля района тунгусской катастрофы. В результате получена оценка наклона траектории тунгусского космического тела в 76° .

Еще раз вернемся к направлению траектории полета именно тунгусского тела, а не других фрагментов, проявившихся в других районах восточной Сибири. С этой целью рассмотрим рис. 6, для объяснения которого на свое время и появился ветер определенного направления, «снесший микрочастицы в преобладающем направлении». Между тем, как отмечалось всеми наблюдателями, «стояла ясная и тихая погода» [30]. Вихрь, испытанный жителями непосредственно в эпицентре событий, носил кратковременный локальный характер и «был вызван метеоритом, а не обыкновенным ураганом» [29]. Поэтому рис. 6 подтверждает прилет тунгусского болида с запада от эпицентра, а не с востока. Проекция средней линии выпадения магнитных микрочастиц здесь тоже примерно на 43° повернута по часовой стрелке от западного направления, хотя и не настолько точно из-за смыва этих микрочастиц ближе к руслам или прямо в русла рек. А вот с восточной части от эпицентра такой концентрации магнитных частиц не наблюдается, хотя при подлете с восточной стороны в безветрен-

ную погоду они обязательно должны были появиться в результате абляции и просто выпадения на финальном участке траектории [35].

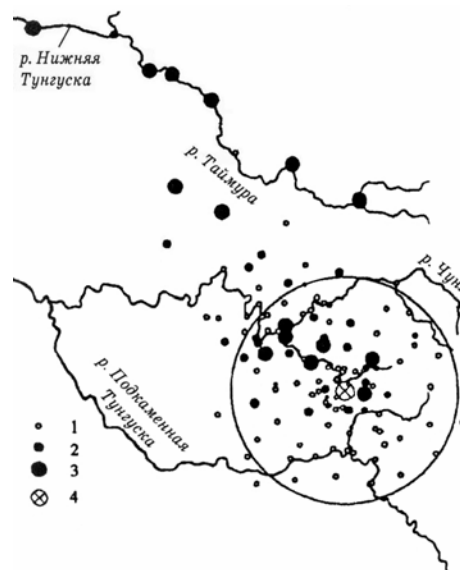


Рис. 6. Распределение магнетитовых шариков в почве на основании работы О. А. Кировой, Н. И. Заславской [36]. Значки, соответствующие цифрам 1–3, отвечают следующей концентрации шариков в пробах: 1 – менее 5; 2 – от 5 до 10; 3 – более 10; область, помеченная цифрой 4, соответствует «эпицентру»

Итак, объяснение магнитных эффектов находится в согласии с основными выводами статьи [28]. Например, обнаруженный эффект «старения» естественной остаточной намагниченности почвы, предшествующей событию 1908 г., может быть объяснен действием коллективного магнитного поля осаждающихся магнитных частиц. Другое дело, что ударная волна не имеет отношения к этому эффекту.

Задержка проявления магнитного эффекта на две с половиной минуты после взрыва связана со временем остывания достаточного количества ферромагнитных частиц ниже точки Кюри.

Теперь о локальности регистрации магнитных явлений. Для наблюдаемой напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля вдали от физического образования с магнитным моментом $\mathbf{M}$ справедлива формула [25; 31]

$$\mathbf{H} = \frac{3\mathbf{r}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{M}) - r^2 \mathbf{M}}{r^5}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}$ – радиус-вектор, проведенный из места локализации магнитного образования в точку наблюдения; r – длина этого вектора; $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{M})$ – скалярное произведение. Прямое расстояние (не по поверхности Земли) от «эпицентра» тунгусской катастрофы до Иркутской обсерватории составляет ~ 900 км. Колебания напряженности $\mathbf{H}$ магнитного поля в Иркутской обсерватории были в пределах $\sim 67 \gamma$, а ее отклонение от нормы достигало 50γ . Тогда из формулы (1) следует, что амплитуда M (евклидова норма) магнитного момента $\mathbf{M}$ лежит в пределах от $Hr^3/2$ до Hr^3 , где $H \sim 0,04$ А/м – амплитуда колебания напряженности $\mathbf{H}$; $r = 9 \cdot 10^5$ м. В итоге амплитуда M порождающего явления должна

лежать между $1,5 \cdot 10^{16}$ и $3 \cdot 10^{16}$ А·м². Поскольку удельный магнитный момент железа ~ 200 А·м²/кг, то для достижения такой амплитуды M потребовалось бы $7,5 \cdot 10^{10}$ т железа или других ферромагнетиков. С учетом незначительного содержания ферромагнетиков в распыленных материалах тунгусского космического тела эту цифру следует признать недостижимой. Поэтому источником колебания магнитного поля в Иркутске в соответствии с предлагаемой гипотезой вряд ли было магнитное образование в «эпицентре». Скорее всего, это было следствие термонамагниченности пылевого осаждения другого фрагмента (или фрагментов) куда меньшего размера, но взорвавшихся и распыленных существенно ближе к Иркутску. Последствия вторжения таких фрагментов в атмосферу действительно наблюдались очевидцами в поселках на север от Иркутска [30].

А что касается описанного эффекта термонамагниченности в «эпицентре», то, несмотря на возможную ничтожность вызванных им колебаний магнитного поля в Иркутске, остальные геометрические рассуждения об осаждении магнитных микрочастиц и вкраплений остаются справедливыми.

Благодарности. Работа частично поддержана грантом № 14-11-00147 Российского научного фонда.

Acknowledgments. This work was partially supported by grant number 14-11-00147 of the Russian Science Foundation.

Библиографические ссылки

1. Васильев Н. В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М. : Русская панорама, 2004. 372 с.
2. Гладышева О. Г. Тунгусская катастрофа: детали головоломки. СПб. : Наука, 2011, 181 с.
3. Rubtsov V. The Tunguska Mystery. Heidelberg : Springer, 2009. 318 с.
4. Иванов К. Г. Геомагнитные явления, наблюдавшиеся на Иркутской магнитной обсерватории вслед за взрывом Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 46–48.
5. Иванов К. Г. О причине последующих изменений поля в геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 1961. Т. 1, № 4. С. 616–618.
6. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект тунгусского падения // Метеоритика. 1964. Вып. 24. С. 141–151.
7. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле / Г. Ф. Плеханов [и др.] // Геология и геофизика. 1961. № 6. С. 94–96.
8. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. М. : Академкнига, 2005. 310 с.
9. Ковалев А. Т., Немчинов И. В., Шувалов В. В. Ионосферные и магнитосферные возмущения в результате падения небольших комет и астероидов // Астрономический вестник. 2006. Т. 40, № 1. С. 65–76.
10. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение челябинского метеороида // Радиофизика и электродинамика. 2013. Т. 4(18), № 3. С. 47–54.

11. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6. С. 854–856.
12. Гольдин В. Д. Об интерпретации некоторых геофизических явлений, сопровождавших падение Тунгусского метеорита // Космическое вещество и Земля. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1986. С. 44–62.
13. Калашников А. Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом // Докл. АН СССР. 1949. Т. 66, № 3. С. 373–376.
14. Калашников А. Г. Магнитный эффект метеоров // Изв. АН СССР. Геофиз. 1952. Вып. 6. С. 7–20.
15. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 32–43.
16. Обашев Г. О. О геомагнитном эффекте Тунгусского метеорита // Метеоритика. 1961. Вып. 21. С. 49–52.
17. Ковалевский А. Ф. К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов // Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та при Томском ун-те. 1962. Вып. 41. С. 87–91.
18. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1963. С. 187–194.
19. Иванов К. Г. Геомагнитные эффекты взрывов в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1962. Т. 2, № 1. С. 153–160.
20. Иванов К. Г. Геомагнитный эффект Тунгусского падения // Метеоритика. 1964. Вып. 24. С. 141–151.
21. Иванов К. Г. Еще раз о проблеме моделирования геомагнитного эффекта Тунгусского падения // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 6. С. 857–858.
22. Кирова О. А. О минералогическом изучении проб почв из района падения Тунгусского метеорита, собранных экспедицией 1958 г. // Метеоритика. 1961. Вып. 20. С. 32–39.
23. Флоренский К. П., Иванов А. В., Ильин Н. П. Химический состав космических шариков из района тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел // Геохимия. 1968. № 10. С. 1163–1173.
24. Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908: Discovery of Meteoritic Debris near the Explosion Site and at the South Pole // Science. 1983. Vol. 220. P. 1158–1961.
25. Боровик Е. С., Еременко В. В., Мильнер А. С. Лекции по магнетизму. М. : Физматлит, 2005. 512 с.
26. Храмов А. Н., Шолпо Л. Е. Палеомагнетизм. М. : Недра, 1967. 224 с.
27. Шайдуров В. В. Другой сценарий тунгусских событий 1908 года // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 97–102.
28. Бояркина А. П., Сидорас С. Д. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита // Геология и геофизика. 1974. № 3. С. 79–84.
29. Астапович И. С. Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири // Астрономический журнал. 1933. Т. X, № 4. С. 465–486.

30. Показания очевидцев тунгусского падения (каталог) / Н. В. Васильев [и др.]. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1981. 205 с.

31. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1978. 526 с.

32. NGDC Geomagnetic Calculators. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). [Electronic resource]. URL: www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/. (accessed 27.03.2015).

33. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. Vol. 361. P. 40–44.

34. Журавлев В. К., Демин Д. В. К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита // *Космическое вещество на Земле*. Новосибирск, 1976. С. 99–104.

35. Svetsov V. V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion // *Nature*. 1996. Vol. 383. P. 697–699.

36. Кирова О. А., Заславская Н. И. Новые данные о распыленном веществе из района падения Тунгусского метеорита // *Метеоритика*. 1966. Вып. 26. С. 119–127.

References

1. Vasil'ev N. V. *Tungusskiy meteorit. Kosmicheskiy fenomen leta 1908 g.* [Tungus meteorite. Space phenomenon of summer 1908]. Moscow, Russkaya panorama Publ., 2004, 372 p.

2. Gladysheva O. G. *Tungusskaya katastrofa: detali golovolomki*. [Tungus catastrophe: pieces of the puzzle]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, 181 p.

3. Rubtsov V. *The Tunguska Mystery*. Heidelberg: Springer, 2009, 318 p.

4. Ivanov K. G. [Geomagnetic phenomena observed in the Irkutsk magnetic observatory after explosion of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 46–48 (In Russ.).

5. Ivanov K. G. [About the reason of the subsequent changes of field in the geomagnetic effect of the Tunguska meteorite]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1961, Vol. 1, No. 4, P. 616–618 (In Russ.).

6. Ivanov K. G. [Geomagnetic effect of Tungus downfall]. *Meteoritika*, 1964, Is. 24, P. 141–151 (In Russ.).

7. Plekhanov G. F., Kovalevskiy A. F., Zhuravlev V. K., Vasil'ev N. V. [On influence of explosion of Tungus meteorite on geomagnetic field]. *Geologiya i geofizika*, 1961, No. 6, P. 94–96 (In Russ.).

8. *Katastroficheskie vozdeystviya kosmicheskikh tel*. [The catastrophic impacts of cosmic bodies]. Ed. V. V. Adushkin and I. V. Nemchinov. Moscow, Akademkniga Publ., 2005, 310 p.

9. Kovalev A. T., Nemchinov I. V., Shuvalov V. V. [Ionospheric and magnetospheric disturbances as a result of the fall of small comets and asteroids]. *Astronomicheskii vestnik*, 2006, Vol. 40, No. 1, P. 65–76 (In Russ.).

10. Chernogor L. F. [Large-scale perturbations in the magnetic field of the Earth, accompanied by a fall of Chelyabinsk meteoroid]. *Radiofizika i elektronika*, 2013, Vol. 4(18), No. 3, P. 47–54 (In Russ.).

11. Bronshten V. A. [The magnetic effect of the Tunguska meteorite]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2002, Vol. 42, No. 6, P. 854–856 (In Russ.).

12. Gol'din V. D. [On the interpretation of some geophysical phenomena accompanied the fall of the Tunguska meteorite]. *Kosmicheskoe veshchestvo i Zemlya*. [Cosmic substance and the Earth]. Novosibirsk, Nauka, Sib. Dep. Pul., 1986, P. 44–62 (In Russ.).

13. Kalashnikov A. G. [On observation of magnetic effect of meteors by induction method]. *Doklady AN SSSR*, 1949, Vol. 66, No. 3, P. 373–376 (In Russ.).

14. Kalashnikov A. G. [The magnetic effect of meteors]. *Izvestiya AN SSSR. Geofizika*, 1952, Is. 6, P. 7–20 (In Russ.).

15. Idlis G. M., Karyagina Z. V. [About cometary nature of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 32–43 (In Russ.).

16. Obashev G. O. [About geomagnetic effect of Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1961, Is. 21, P. 49–52 (In Russ.).

17. Kovalevskii A. F. [On the mechanism of geomagnetic effects of large explosions]. *Trudy Sib. fiziko-tehnicheskogo inst.*, 1962, Is. 41, P. 87–91 (In Russ.).

18. Kovalevskii A. F. [Magnetic effect of Tunguska meteorite explosion]. *Problema Tungusskogo meteorita*. Tomsk, Tomsk St. University Publ., 1963, P. 187–194 (In Russ.).

19. Ivanov K. G. [Geomagnetic effects of explosions in the lower atmosphere]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1962, Vol. 2, No. 1, P. 153–160 (In Russ.).

20. Ivanov K. G. [Geomagnetic effect of the Tunguska fall]. *Meteoritika*, 1964, Is. 24, P. 141–151 (In Russ.).

21. Ivanov K. G. [Once again about the problem of modeling the geomagnetic effect of Tunguska fall]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2002, Vol. 42, No. 6, P. 857–858 (In Russ.).

22. Kirova O. A. [About mineralogical study of the soil samples from the area of the Tunguska meteorite fall, collected by the expedition in 1958]. *Meteoritika*, 1961, Is. 20, P. 32–39 (In Russ.).

23. Florenskiy K. P., Ivanov A. V., Il'in N. P. [The chemical composition of cosmic balls from the area of the Tunguska catastrophe and some questions of substance differentiation of cosmic bodies]. *Geokhimiya*, 1968, No. 10, P. 1163–1173 (In Russ.).

24. Ganapathy R. The Tunguska Explosion of 1908: Discovery of Meteoritic Debris near the Explosion Site and at the South Pole. *Science*, 1983, Vol. 220, P. 1158–1961.

25. Borovik E. S., Eremenko V. V., Mil'ner A. S. *Lektsii po magnetizmu*. [Lectures on magnetism]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 512 c.

26. Khranov A. N., Sholpo L. E. *Paleomagnetizm*. [Paleomagnetism]. Moscow, Nedra Publ., 1967, 224 p.

27. Shaydurov V. V. [Another scenario of the Tunguska event in 1908]. *Vestnik SibGAU*, 2014. No. 1(53), P. 97–102 (In Russ.).

28. Boyarkina A. P., Sidoras S. D. [Paleomagnetic studies in the area of the Tunguska meteorite fall]. *Geologiya i geofizika*, 1974, No. 3, P. 79–84 (In Russ.).

29. Astapovich I. S. [New materials on the flight of a large meteorite June 30, 1908 in Central Siberia]. *Astronomicheskiy zhurnal*, 1933, Vol. X, No. 4, P. 465–486 (In Russ.).
30. Vasil'ev N. V., Kovalevskiy A. F., Razin S. A., Epitektova L. E. *Pokazaniya ochevidtsev tungusskogo padeniya (katalog)*. [Eyewitness testimonies of the Tunguska fall (catalog)]. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 1981, 205 p.
31. Yanovskiy B. M. *Zemnoi magnetizm*. [Earth's magnetism]. Leningrad University, 1978, 526 p.
32. NGDC Geomagnetic Calculators. *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Available at: www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/ (accessed 27.03.2015).
33. Chyba C. F., Thomas P. J., Zahnle K. J. The 1908 Tunguska explosion: atmospheric disruption of a stony asteroid. *Nature*, 1993, Vol. 361, P. 40–44.
34. Zhuravlev V. K., Demin D. V. [To a question on chemical composition of the Tunguska meteorite]. *Kosmicheskoe veshchestvo na Zemle*. [Cosmic substance on Earth]. Novosibirsk, 1976, P. 99–104.
35. Svetsov V. V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion. *Nature*, 1996, Vol. 383, P. 697–699.
36. Kirova O. A., Zaslavskaya N. I. [New data on the sprayed material from the area of the Tunguska meteorite]. *Meteoritika*, 1966, Is. 26, P. 119–127 (In Russ.).

© Шайдуров В. В., 2015

**USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTATION OF INTEGRATED METHODS
IN TEACHING AEROSPACE SPECIALISTS ENGLISH FOR SCIENTIFIC PURPOSES**

N. A. Shumakova

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: shumna@inbox.ru

The article considers the content of the course of post graduate students' training in a foreign language for scientific purposes in a technical university of aerospace profile. The experience of work in the context of SibSAU training of young scientists to effectively functioning in an international professional scientific community is analyzed. The experience of work in connection with the growing trend of writing scientific texts (articles, publications, monographs, etc.) in a foreign language (English) is presented. A complex structure of work with postgraduate students in teaching a foreign language for scientific purposes is developed and presented. Particular attention is paid to the integration of Internet resources in the process of preparing for the candidate's exam in a foreign language, and subsequent publications in international scientific systems such as Web of Science, Scopus. The article reflects the experience of testing and implementation of various Internet sources, presents the most effective ones. High cognitive professionally-oriented and didactic potential of the Internet technologies used is marked. Particular attention is paid to the scientific search systems, allowing a full-text search on articles of major foreign publishers' magazines, articles in the archives of articles and preprints, scientific resources of Internet. Links for work with authentic scientific periodicals, modern dictionaries and encyclopedias are proposed. The article maybe of interest to postgraduate students of technical universities of aerospace profile, preparing for the successful functioning in the scientific community in order to accommodate their publications in leading peer-reviewed journals, as well as for foreign language teachers using in integrated methods in teaching a foreign language for scientific purposes.

Keywords: foreign language in a technical university of aerospace profile, English for scientific purposes, publications in foreign languages, the integration of Internet resources in education, scientific search systems, Internet technologies, integrated methods of teaching.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 3. С. 632–636**ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕТОДИК ПРИ ОБУЧЕНИИ АНГЛИЙСКОМУ ЯЗЫКУ
ДЛЯ НАУЧНЫХ ЦЕЛЕЙ СПЕЦИАЛИСТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

Н. А. Шумакова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: shumna@inbox.ru

Рассмотрено содержание курса подготовки аспирантов по иностранному языку для научных целей в техническом вузе аэрокосмической направленности. Проанализирован опыт работы СибГАУ в контексте подготовки молодых ученых к эффективному функционированию в международной профессиональной научной среде. Представлен опыт работы в связи с нарастающей тенденцией написания научных текстов (статей, публикаций, монографий и т. д.) на иностранном (английском) языке. Разработана и представлена комплексная структура работы с аспирантами при обучении иностранному языку для научных целей. Особое внимание уделено интеграции интернет-ресурсов в процесс подготовки к кандидатскому экзамену по иностранному языку и последующих публикаций в международных научных системах, таких как Web of Science, Scopus. Отражен опыт апробации и внедрения различных интернет-источников, представлены наиболее эффективные из них. Отмечен большой когнитивный, профессионально ориентированный и дидактический потенциал применяемых интернет-технологий. Особое внимание уделено научным поисковым системам, позволяющим осуществлять полнотекстовый поиск по статьям журналов крупных иностранных издательств, статьям в архивах статей и препринтов, научным ресурсам Интернета. Предложены ссылки по работе с аутентичной научной периодикой, современными словарями и энциклопедиями. Статья может представлять интерес для аспирантов

технического вуза аэрокосмической направленности, готовящихся к успешному функционированию в научной среде с целью размещения работ в ведущих мировых изданиях, а также для преподавателей иностранного языка, использующих информационные технологии в процессе реализации интегрированных методик при обучении иностранному языку для научных целей.

Ключевые слова: иностранный язык в техническом вузе аэрокосмической направленности, английский для научных целей, публикации на иностранном языке, интеграция интернет-ресурсов в обучение, научные поисковые системы, интернет-технологии, интегрированные методики.

Introduction. Implementation of information and communication technology in the academic activity and scientific research process is an essential requirement for the realization of the RF Higher Education Modernization Conception. In the perspective of formation of innovative economics in the context of this Conception it is necessary to update technologies constantly, use advanced mastering of innovations and rapidly adapt for the demands of dynamic world. It is important to remember that the key element of global competition is an availability of high quality education [1]. Nowadays there is a great need for aerospace industry specialists to have a good command of a foreign language for scientific purposes. The level of language proficiency is an important criterion of aerospace industry specialists' professionalism as there is a necessity to deal with foreign colleagues, obtain information from international scientific sources, participate in international scientific events and to publish the results of their researches in the peer-reviewed journals with high citation index. The knowledge of English for scientific purposes enables young researchers to transfer the results of the performed researches to the international level. Nowadays SibSAU's researchers actively participate in international scientific and academic projects. Scientific contacts with our foreign colleagues have become numerous. All the above mentioned factors caused the necessity of English for scientific purposes skills development. In this case English for scientific purposes is considered as a means of obtaining adequate modern knowledge from scientific professional sphere [2].

Integration of Internet Resources. As a result of learning a course of English for scientific purposes post graduates should get the experience of large volume of authentic texts (monographs, scientific articles, reports of international specialists) processing. They should be able to write a grant proposal in order to participate in scientific conferences, to draw up application forms for conferences.

The methodology of teaching English for scientific purposes is connected with effective planning and organizing both classroom activities and independent students' activity. The academic content of English for scientific purposes course in this context is one of the most important elements of the integral structure of academic process planning. In connection with this there is a need for analyzing pedagogical and methodological terms, contributing the efficiency of training.

In SibSAU great experience of work with post graduates on foreign languages for scientific purposes is accumulated. Working with postgraduates in this field we use complex approach. Further we'll dwell upon the main elements of this complex in more details. In particular these elements are practical and theoretical at different

stages of the course. Special attention herein will be paid to the results and the forms of control.

Key concepts and terms introduced. At the overview lecture we usually introduce the key concepts and terms used by the participants of the publishing activity. The educator's task here is to prepare a postgraduate student for further publications in the international peer-reviewed sources included in the Web of Science and Scopus. Here are the examples of the things being introduced.

Web of Knowledge is the largest searching platform uniting scientific articles, patents, websites and conferences' materials.

Web of Science is the component of Web of Knowledge platform providing access to scientific articles in different fields.

Scopus is a bibliographical abstracts' database allowing following citation ratio.

Impact factor is a quantitative index reflecting the level of scientific journal registered in the Web of Science. It shows average number of citations of each article published in two years after its publication and is a proportion of the number of the article citations to the number of all the articles published in this journal.

Hirsch index is a quantitative index evaluating a scientist, a group of researches or a scientific organization.

Russian Science Citation Index (RSCI) is a national information analytical system accumulating more than 4.7 million publications of national authors and containing information about citation of these publications from more than 4000 Russian journals. It is intended not only for effective provision of scientific researches with urgent indicative bibliographical information, but is also an effective tool allowing appreciating the results of the scientific research organizations and scientists activity and the level of the scientific journal.

Preparation of the presentation has a special place during classes for post graduates. One of the topics for such presentations is "My dissertation proposal" where they reinforce the skills on formulating the topic, object and subject of the research; present its main tasks in English. Another example of the presentation is "Peer-reviewed journals of Scopus and Web of Science systems in my field of research". Here the postgraduates present different journals in their field of study paying special attention to the terms of publishing.

Another important element of the course is teaching preparing a resume "My researcher's profile", writing annotated bibliography and abstract in English.

Public presentation of the report is a final part of the course and assessment tool.

Reasons for integration of Internet resources. One of the most available optimization tools in the field of

teaching postgraduates English for scientific purposes is integration of Internet resources into the academic process in technical university of aerospace profile. Internet resources have already become an integral part of the educational process in SibSAU. These tools started to be actively used in 2006–2007. It should be noted that the use of the Internet greatly influences the technology of delivery information to the postgraduate students. In these terms the role of independent work is increasing and the autonomy of studying is developing.

The use of Internet for teaching English for scientific purposes amid the global economic crises becomes justified, as it reduces expenses on paying for supplementary education (foreign language courses), buying expensive authentic textbooks and monographs which get out of date and loose novelty very quickly. Besides, electronic publications provide achievement of four basic advantages: international accessibility, speed, additional facilities and low cost [3].

Information and communication technologies create new global environment, mediating a great number of Internet resources, supplying academic and scientific information in foreign (English) language. In the methodology of teaching Foreign languages there exists a new direction such as e-learning having been developed both by foreign and national researchers. Internet resources enable to teach all types of speech activity, though teaching writing and reading are higher-priority ones.

Great number of Internet resources was investigated by the specialists of SibSAU. Some useful scientific search systems, catalogues and back files of scientific periodicals were revealed and could be recommended to the masters and postgraduates of various directions in their work with authentic textbooks, journals, monographs etc.

Scientific searching systems recommended. Both while preparing for passing their candidate exam in English and in the process of conducting the research postgraduates spend a lot of time on searching and translating monographs on their specialty, work with a glossary, writing abstracts of authentic scientific materials. Besides they are to publish the results of their researches in the peer reviewed journals of such systems as Scopus and Web of science. In this connection it is proposed to study those electronic recourses which could be useful for them at our lessons.

In our opinion special attention should be paid to the following searching systems.

ScienceDirect is home to almost one-quarter of the world's peer-reviewed full-text scientific, technical and medical content. Over 15 million researchers, health care professionals, teachers, students and information professionals around the globe rely on ScienceDirect as a trusted source of nearly 2.500 journals and more than 26.000 book titles. ScienceDirect supports research and education with interactive elements in articles such as audio, video, graphs, tables and images, and offers tools so users can keep current with research trends. Content on ScienceDirect also features embedded links to external datasets, including earth and environmental science data from PANGAEA, abstract and indexing data from Scopus and chemical reactions data from Reaxys. With over 12.6

million content pieces available – including pre-publication articles and open access content from Elsevier journals – ScienceDirect is a premier platform for discovering the world of research [4].

Google Scholar is also a scientific searching system. GS index includes most peer-reviewed online journals of the world's largest scientific publishers, preprints' archives, publications at universities', scientific societies' and other scientific organizations' sites. GS allows users to search for digital or physical copies of articles, whether they are online or in libraries [5]. Through its "cited by" feature, GS provides access to abstracts of articles that have cited the article being viewed [6]. It searches the articles both in English and in Russian. What is more important it calculates publications' citation index and allows finding the articles containing references for those which had been already published.

Science Research Portal is a scientific searching system scanning a full text search in magazines of large scientific publishers, such as Elsevier, Highwire, IEEE, Nature, Taylor & Francis. It scans articles and documents in the open databases such as: Directory of Open Access Journals, Library of Congress Online Catalog, Science.gov and Scientific News.

Windows Live Academic is Microsoft's beta software. It is targeted for the search of scientific articles both in open sources and paywall archives of publications. At the moment the system includes the articles in physics, computer technologies, electrical technology and allied subjects.

Sources for the search of scientific articles. Dealing with annotated bibliographies it is necessary to investigate numerous sources of scientific information. Here we propose such links as:

- DOAJ (Directory of Open Access Journals) is a catalogue of more than 1463 free access journals. The retrospection is from the year 2000. A new version of DOAJ includes records on the level of articles and allows searching the articles in all Open Access Journals. Now through the Directory of Open Access Journals the researchers can carry out the search on 46000 articles with a guarantee of getting access to the articles' texts [7];

- World Newspapers is a catalogue of English language newspapers, magazines and news' sites published all over the world. The search is conducted according to the title of a periodical and their abstracts. One can choose the publication either according to the subject headlines or according to the country of a publication [8];

- JSTOR is a database of academic articles and a scholarly journal archive. It both creates and keeps an available archive of important scientific journals and offers access of a great number of researchers to it. JSTOR permits the researchers the opportunity to extract scan high-resolution images of journals' issues and separate pages of the journals in their original appearance (how they were composed, printed and illustrated) [9].

Doubtless is the necessity to introduce modern on-line dictionaries and encyclopedias. We often recommend the following.

Britannica is a web-based of the most authoritative encyclopedia in the world. It contains more than 75 thousand articles in all branches of knowledge. It is annually

updated. The results of the search include not only texts from encyclopedia, but also references to Internet resources and some journal publications. The encyclopedic articles are interconnected by numerous hyperlinks. Now Britannica is a fee-based resource [10].

Microsoft Encarta is the Internet version of famous universal encyclopedia annually issued by Microsoft on CD-ROMs and DVD. It contains more than 41000 of articles, great number of illustrations, audio and video files. The majority of multimedia objects including audio and video are accessible through Internet. Key word search and navigation general-to-specific are possible. The articles' texts have hyperlinks. The articles are weekly renewed. As additional services the search on the topics in the Internet, news MSNBC or Barnes @ Noble bookshop catalogue are proposed [11].

Special resources for technical students. During the period of approbation and implementation of the Internet tools into the training process there outlined a number of important and effective resources. The advantages of these tools were highly appreciated by the postgraduate students.

In order to keep the level of English on track we recommend the following useful links of on line magazines and newspapers:

<http://www.theguardian.com/uk;>

<http://www.economist.com;>

[http://www.businessweek.com/;](http://www.businessweek.com/)

<http://www.learnerstv.com/> is academic video courses on Management and Economics <http://freevideolectures.com/> video courses on Management and Economics.

For technicians the following recourses could also be recommended:

<https://tefltastic.wordpress.com/worksheets/technical-english/> [12];

<http://eslrightnow.com/english-for-engineering/> [13];

http://www.youtube.com/channel/UCS5ME54d_iJ0cOZun4ikKQ <http://www.propofs.com/quiz-school/story.php?title=technicalengineering-english-test;>

<http://www.monash.edu.au/lls/llonline/grammar/index.xml> grammar for engineers [14];

http://www.cambridge.org/it/elt/catalogue/subject/project/custom/item2489163/Cambridge-English-for-Engineering-Resources/?site_locale=it_IT¤tSubjectID=2561588 case studies for Cambridge English for Engineering.

Resources for development of basic linguistic skills.

Besides we highly recommend the following resources:

<http://www.scribd.com/> is for development of reading skills, creation of individual materials and tests for reading in IELTS format and in other formats, giving the opportunity to share the texts and to see the ratings;

<http://www.ted.com/>, <http://www.bbc.co.uk/world-service/learningenglish/general/sixminute/> are examples of video and audio podcasts with the possibility of text creation;

<http://azargrammar.com/index.html>, <http://www.englishpage.com/index.html> are grammar and grammar tests;

<http://voicethread.com/#home>, <http://englishcentral.com/home?ref=logo>, <http://vocaroo.com/> are links for development of speaking skills with the emphases on pronunciation and speech fluency;

<http://www.listen-and-write.com/> are for development of listening and writing skills, <https://docs.google.com/#home> is the link for creation of Google form tests enabling to conduct collaborative editing and discussing [15].

Conclusion. The analysis of each separate effective technology, used at different stages of teaching postgraduates is a complicated longtime process and can become the subject of a special discussion. In this connection in conclusion one can mention that the implementation of Internet technologies into the teaching process of postgraduate students positively effects cognitive-informative, professionally-oriented and didactic potential. It creates positive emotional educational environment, developing autonomy, ability of critical thinking and independent decision making.

Having described integrated methods of teaching postgraduates of technical university of aerospace profile English for scientific purposes on a complex based methodology we must conclude that curriculum content is aimed at postgraduates' comprehensive training in the field of professional communication in the international educational and scientific environment. Positive experience of integration of Internet resources, e-learning and other innovative forms of work in the process of training is accumulated. Effective methods of training are worked out.

Библиографические ссылки

1. Система ГАРАНТ [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/194365/#ixzz3PKRcCcCo> (дата обращения: 20.02.2015).

2. Шумакова Н. А., Ворошилова А. А. English for postgraduate students : учеб. пособие для аспирантов / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 108 с.

3. Васильева П. А., Кочергина О. А. Интеграция интернет-ресурсов в обучение иностранному языку студентов неязыкового вуза в условиях глобального кризиса // Глобальный экономический кризис: реалии и пути преодоления : сб. науч. ст. СПб. : Ин-т бизнеса и права, 2009. С. 30–32.

4. Elsevier [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elsevier.com/online-tools/sciencedirect/who-uses-sciencedirect> (дата обращения: 20.02.2015).

5. ScholarGoogle [Электронный ресурс]. URL: <http://scholar.google.com/> (дата обращения: 20.02.2015).

6. ScholarGoogle [Электронный ресурс]. URL: <http://scholar.google.co.uk/intl/en/scholar/help.html> (дата обращения: 20.02.2015).

7. DOAJ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.doaj.org/> (дата обращения: 20.02.2015).

8. World Newspaper [Электронный ресурс]. URL: <http://www.world-newspapers.com> (дата обращения: 20.02.2015).

9. JSTOR [Электронный ресурс]. URL: <http://www.jstor.org/> (дата обращения: 20.02.2015).

10. Encyclopedia Britannica [Электронный ресурс]. URL: <http://www.britannica.com> (дата обращения: 20.02.2015).

11. MSNEncarta [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microsoft.com/presspass/newsroom/msn/factsheet/MSNEncartaPremiumFS.msp> (дата обращения: 20.02.2015).

12. *TEFLtasticblog* [Электронный ресурс]. URL: <http://tefltastic.wordpress.com/worksheets/technical-english/> (дата обращения: 20.02.2015).

13. *ESLRightNow* [Электронный ресурс]. URL: <http://eslrightnow.com/english-for-engineering/> (дата обращения: 20.02.2015).

14. *Monash University*. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.monash.edu.au/lls/llonline/grammar/index.xmlgrammar for engineers](http://www.monash.edu.au/lls/llonline/grammar/index.xmlgrammar%20for%20engineers) (дата обращения: 20.02.2015).

15. Кузьмина Т. А. Опыт использования технологий и инструментов WEB 2 в преподавании академического английского (ESP/EAP) в НИУ ВШЭ // Профессионально ориентированное обучение иностранному языку и переводу в вузе : материалы ежегод. Междунар. конф. (19–20 апр. 2013, г. Москва). М. : РУДН, 2013. С.165–166.

References

1. *Sistema GARANT* [System Garant]. Available at: <http://base.garant.ru/194365/#ixzz3PKRcCcCo> (accessed 20.02.2015).

2. Shumakova N. A., Voroshilova A. A. English for post graduates students. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2012, 108 p.

3. Vasil'eva P. A., Kochergina O. A. [Integration of internet resources in teaching foreign languages students of non-linguistic university in the conditions of global crises]. *Sbornik nauchnykh statey "Global'ny ekonomicheskiy krizis: realii i puti preodoleniya* [Collection of scientific articles "Global economic crises: reality and ways out"]. St. Petersburg, Institut bizneca i prava Publ., 2009, p. 30–32 (In Russ.).

4. *Elsevier*. Available at: <http://www.elsevier.com/online-tools/sciencedirect/who-uses-sciencedirect> (accessed 20.02.2015).

5. *Scholar Google*. Available at: <http://scholar.google.com/> (accessed 20.02.2015).

6. *Scholar Google*. Available at: <http://scholar.google.co.uk/intl/en/scholar/help.html> (accessed 20.02.2015).

7. *DOAJ*. Available at: <http://www.doaj.org/> (accessed 20.02.2015).

8. *World Newspaper*. Available at: <http://www.world-newspapers.com> (accessed 20.02.2015).

9. *JSTOR*. Available at: <http://www.jstor.org/> (accessed 20.02.2015).

10. *Encyclopedia Britannica*. Available at: <http://www.britannica.com> (accessed 20.02.2015).

11. *MSN Encarta*. Available at: <http://www.microsoft.com/presspass/newsroom/msn/factsheet/MSNEncartaPremiumFS.msp> (accessed 20.02.2015).

12. *TEFLtastic blog*. Available at: <https://tefltastic.wordpress.com/worksheets/technical-english/> (accessed 20.02.2015).

13. *ESL Right Now*. Available at: <http://eslrightnow.com/english-for-engineering/> (accessed 20.02.2015).

14. *Monash University*. Available at: <http://www.monash.edu.au/lls/llonline/grammar/index.xmlgrammarforengineers> (accessed 20.02.2015).

15. Kuz'mina T. A. [The experience of technologies and WEB2 instruments usage in teaching foreign languages]. *Materialy ezhegodnoy mezhdunarodnoy konferentsii "Professional'no orientirovannoe obuchenie inostrannomu yazyku i perevodu v vuze: materialy ezhegodnoy mezhdunarodnoy konferentsii* [Materials of annual international conference "Professional'no orientirovannoe obuchenie inostrannomu yazyku i perevodu v vuze"]. Moscow, 2013, P. 165–166 (In Russ.).

РАЗДЕЛ
PART
2



АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА

AVIATION
AND SPACECRAFT
ENGINEERING



**ВЛИЯНИЕ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ШАРА НА ВЕЛИЧИНУ
ИЗМЕРЯЕМОЙ ГЛУБИНЫ ВДАВЛИВАНИЯ ШАРА
ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ВЕРХНЕЙ ТОЧКИ ШАРА**

Н. Н. Автономов, А. В. Тололо*

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: 8350474@gmail.com

Для исследования элементов конструкций аэрокосмических аппаратов особый интерес представляет метод непрерывного вдавливания шарового индентора, так как этот метод может использоваться при испытаниях непосредственно на месте эксплуатации без изготовления образцов стандартных размеров. Проведенный анализ предлагаемого устройства, реализующего метод непрерывного вдавливания шарового индентора с записью диаграммы «сила – глубина вдавливания», на предмет погрешности измерения глубины вдавливания показал минимальную погрешность измерения глубины вдавливания благодаря размерной цепи с малым количеством звеньев стабильных размеров и оригинальным решениям, позволяющим определять глубину вдавливания шара по перемещению верхней точки шара. Единственным звеном размерной цепи, изменяющим свои размеры под нагрузкой, является вдавливаемый шар. Также рассмотрено численное решение задачи о вдавливании упругого шара в упруго-пластический образец. Целью исследования является установление вклада осевой деформации шара под нагрузкой на величину измеряемой глубины вдавливания шара по перемещению верхней точки шара и возможность определения реальной глубины вдавливания шара при исследованиях механических свойств материала, использующих метод вдавливания шарового индентора. Для исследования контакта шара и образца была использована программа ANSYS Multiphysics 15.0, реализующая метод конечных элементов для решения задач теории упругости и пластичности с учетом контактного взаимодействия двух тел. В процессе исследования было установлено, что величина относительной осевой деформации шара остается постоянной в упругой области нагружения образца и зависит от отношения модулей упругости шара и образца. Это позволило получить поправочную зависимость, по которой, зная модули упругости шара и образца, можно получить вклад осевой деформации шара и реальную величину глубины вдавливания шара. Таким образом, используя предлагаемое устройство и найдя верхнюю точку перемещения шара, можно определить реальную глубину вдавливания шара с учетом вклада осевой деформации шара.

Ключевые слова: вдавливание шарового индентора, метод конечных элементов, осевая деформация шара.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 638–644**AXIAL BALL STRAIN INFLUENCE ON MEASURABLE VALUE OF BALL INDENTATION
BY TOP POINT OF BALL**

N. N. Avtonomov, A. V. Tololo*

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: 8350474@gmail.com

The automated ball indentation method is of special interests for aerospace industry at present time since this method can be used in situ test without making standard specimen. During the ball indentation depth of proposed device testing, applying automated ball indentation for acquisition of force-displacement diagram showed that this device has a minimal dimension chain. This was made possible due to the device original construction allowing measuring of the ball indentation depth by top ball point displacement. Only one element of dimension chain having dimension modifications was an indentation ball. Also the ball indentation numerical solution was presented. The object of this research is the determination of axial strain influence on measurable value of ball indentation by top point of ball and real ball indentation definition applicable in automated ball indentation tests. For the ball and specimen contact analysis ANSYS Multiphysics 15.0 software that realized finite elements method for theory of elasticity problem solution considering two solid contact was used. In the process of investigation it was revealed that relative ball axial strain value remains constant in loading elastic region and depends on ball and specimen modulus of elasticity relation.

It is allowed to find relative axial ball strain and real ball indentation depth formulas by knowing ball and specimen modulus of elasticity. Thus, using the proposed device and finding the top ball point allows to determine the real ball indentation depth, considering the axial ball strain contribution that was used in situ test taking into account the force-displacement diagram and possibility to find yield point.

Keywords: automated ball indentation, finite elements method, ball axial strain.

Введение. Большой интерес для аэрокосмической отрасли в данное время представляют безобразцовые методы получения механических свойств материала с записью диаграммы вдавливания и получением предела текучести σ_T [1]. Дело в том, что в процессе эксплуатации авиатехники и орбитальных станций не всегда есть возможность для определения механических свойств материала элемента конструкции изготовить образец стандартных размеров и испытать его на разрывной машине, получив на выходе диаграмму напряжения [2]. Чаще всего в данной ситуации прибегают к использованию ударных твердомеров, однако с помощью этих устройств можно получить лишь число твердости и на основе ранее накопленных статистических данных определить предел прочности σ_B [3]. Однако не меньший интерес представляет определение предела текучести σ_T [4] и особенности поведения материала при непрерывном вдавливании [5]. В статье рассматривается предлагаемое нами устройство, реализующее метод непрерывного вдавливания шарового индентора с записью диаграммы «сила – глубина вдавливания», его анализ и преимущества перед аналогами.

Очень важным вопросом в реализации методов непрерывного вдавливания с использованием шарового индентора [6] является точность определения глубины вдавливания шарового индентора, поскольку даже если глубина вдавливания шара измеряется по наиболее подходящей для этого перемещению верхней точки шара, встает вопрос вклада осевой деформации шара в величину глубины вдавливания шара при нагружении. Для исследования вклада осевой деформации шара было принято решение использовать численные методы, реализующие МКЭ.

Анализ предлагаемого устройства. Рассмотрим предлагаемый нами прибор [7] – измерительную головку (рис. 1, 2) к нагружающему устройству для регистрации нагрузки и глубины вдавливания. Прибор предназначен для определения глубины вдавливания шарового индентора в упруго-пластический образец.

Выбранная схема измерения глубины внедрения шарового индентора с использованием специальной детали – обоймы 6, прижатой к образцу 1, с закрепленной на ней датчиком перемещения 13 и измерительного стержня 4, упирающегося непосредственно в шаровой индентор 2, позволяет устранить погрешности измерений, свойственные представленным выше приборам.

Основным силовым элементом устройства является корпус 7. Сверху в корпус установлен динамометр 9, который предназначен для регистрации значений усилия под воздействием нагрузки посредством четырех тензодатчиков сопротивления (12). В полость внутри динамометра входит толкатель 10, который

передает нагрузку от твердомера Бринелля к динамометру. На противоположном торце толкателя присутствует коническое углубление, в котором находится шарик 8, передающий нагрузку от толкателя динамометру. В нижней части конструкции находится обойма 6. Она вплотную прилегает к верхней поверхности образца 1. Обойма – это деталь, на которой крепится балка 5, измеряющая глубину внедрения шарика. Снизу в корпус установлена заглушка 11.

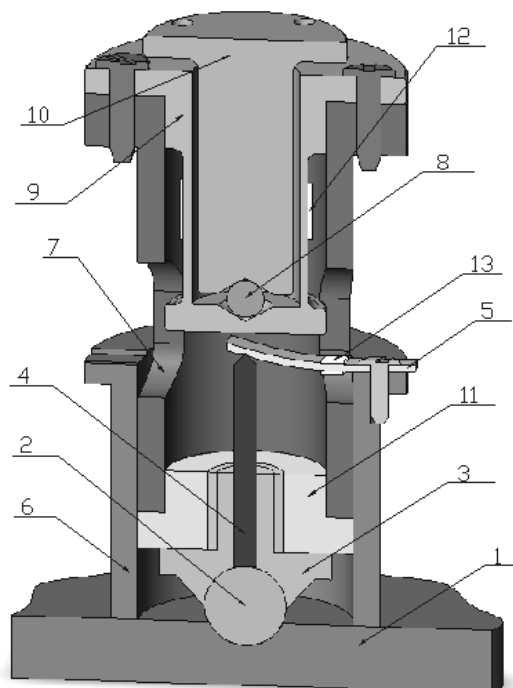


Рис. 1. Аксонометрический вид измерительной системы

Снизу в заглушку входит наконечник 3. Наконечник имеет осевое отверстие. В углубление наконечника устанавливается шарик 2, в который через отверстие упирается измерительный стержень 4. Шарик, в свою очередь, упирается в образец 1. Балка 5 отслеживает глубину вдавливания индентора через стержень 4. Для этого на балку наклеены два тензометрических датчика.

Сущность работы головки заключается в следующем. Корпус 7 с прилегающим снизу наконечником 3, в углублении которого находится шарик 2, и обоймой 6 опускают на исследуемую деталь 1 так, что кольцевая площадка обоймы 6 и шарик 2 одновременно упираются в деталь 1. Затем обойма остается на месте, а шарик под действием нагрузки внедряется в образец. Глубину внедрения регистрируют тензометрические датчики 13 при изгибе балки 5 измерительным стержнем, который нижним своим торцом упирается в верхнюю точку шарика 2, а нагрузку регистрирует упругий элемент динамометра 7. Сигналы с установленных

на измерительной головке датчиков подаются либо на двухкоординатный самописец, либо на чувствительные вольтметры, либо на аналогово-цифровой преобразователь ПЭВМ.

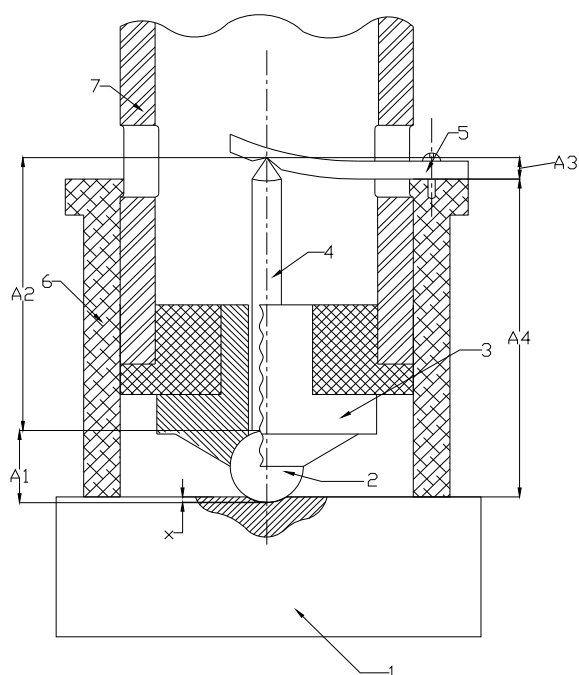


Рис. 2. Схема измерительной системы

Глубина вдавливания шара равна $x_4 = (A_1 + A_2) - (A_3 + A_4)$, где A_1 – размер шара, изменяющийся под нагрузкой вдавливания; A_2 – размер измерительного стержня, находящегося под нагрузкой от изогнутой балки (~10–20 Н); A_3 – размер, изменение которого отслеживается упругой балкой с приклеенными тензодатчиками сопротивления; A_4 – высота обоймы, упирающейся в испытываемую деталь и находящейся под нагрузкой, необходимой для замыкания контакта (~30–40 Н).

Погрешность измерения $\Delta x_4 = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3 + \Delta A_4$. Величины A_2 и A_4 , очевидно, изменяются незначительно. Соответственно $\Delta A_2 \approx \Delta A_4 \approx 0$. Погрешность измерения будет складываться только из величин ΔA_1 (изменение размера шара под действием нагрузки) и ΔA_3 (погрешности измерения перемещения при помощи упругой балки).

По сравнению с существующими аналогами [8–10] предлагаемый прибор благодаря своей оригинальной конструкции имеет минимальную погрешность измерения глубины вдавливания индентора относительно поверхности образца и может быть использован для более точного исследования закономерностей, возникающих при вдавливании индентора в упруго-пластический материал образца и улавливания момента перехода его от упругого поведения к упруго-пластическому [11]. Единственный вопрос относительно устройства, который нуждается в решении, – это вклад осевой деформации шара в величину измеряемой глубины вдавливания.

Определение вклада осевой деформации шара.

Для исследования контакта шара и образца была использована программа ANSYS Multiphysics 15.0, реализующая метод конечных элементов для решения задач теории упругости и пластичности с учетом контактного взаимодействия двух тел (расчетная схема – на рис. 3) [12–15]. В расчетах смоделирован шар диаметром 10 мм со свойствами стали ШХ15. В качестве материалов для образца использованы алюминиевый сплав АМГ-61, титан ВТ1 и сталь 08Х18Н10Т с механическими свойствами, указанными в таблице. Определяли перемещение двух точек шара – верхней и нижней. Максимальная нагрузка была установлена 5, 40 и 20 Н соответственно.

В процессе решения задачи были получены графики зависимости глубины вдавливания шара от приложенной нагрузки для материалов АМГ-61, ВТ-1 и 08Х18Н10Т (рис. 4–6), измеренные по перемещению верхней точки шара (на рис. 4–6: 1а – упругое решение, 1б – упруго-пластическое решение) и нижней точки шара (на рис. 4–6: 2а – упругое решение, 2б – упруго-пластическое решение).

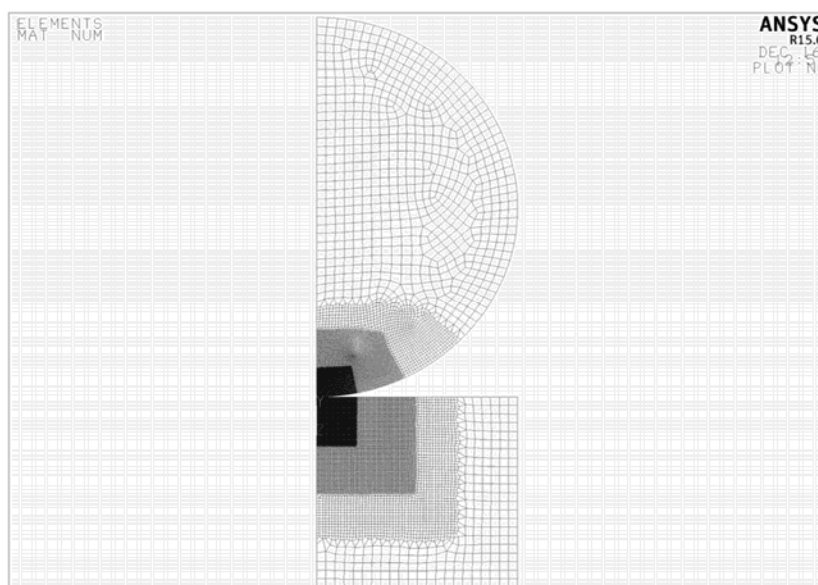


Рис. 3. Расчетная модель контакта шара и образца. Общий вид



Рис. 4. Зависимость глубины вдавливания от нагрузки, измеренная по перемещению, для материала АМГ-61: 1а – нижней точки шара для упругого случая; 1б – нижней точки шара для упруго-пластического случая; 2а – верхней точки шара для упругого случая; 2б – верхней точки шара для упруго-пластического случая



Рис. 5. Зависимость глубины вдавливания от нагрузки, измеренная по перемещению, для материала ВТ1: 1а – нижней точки шара для упругого случая; 1б – нижней точки шара для упруго-пластического случая; 2а – верхней точки шара для упругого случая; 2б – верхней точки шара для упруго-пластического случая

Из графиков видно, что при определении глубины вдавливания шара по перемещению верхней точки шара существенный вклад в конечную величину измеряемой глубины вдавливания шара вносит осевая деформация самого шара. Для разных материалов величина этого вклада различна, но в целом картина остается схожей.

Для того чтобы оценить величину вклада осевой деформации в измеряемую глубину вдавливания шара был рассчитан относительный вклад осевой деформации шара в величину глубины вдавливания шара:

$$\xi = (\Delta h_f / h_H) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\Delta h_{ш} = h_B - h_H$; h_B и h_H – изменение положения по оси Y верхней и нижней точки шара соответственно.

При упругом решении задачи уровень вклада осевой деформации шара в величину измеряемой глубины вдавливания шара остается постоянным (рис. 7).

При упруго-пластическом решении во время установления упругого контакта шара и образца также наблюдается постоянная величина вклада осевой деформации шара в измеряемую глубину вдавливания шара на уровне 35, 56 и 95 % для материалов АМГ-61, ВТ-1 и 08Х18Н10Т (рис. 8). Также наблюдается прямо пропорциональная зависимость между отношением модулей упругости образца и шара:

$$\xi \sim 101 \cdot \frac{E_{f \text{ ад}}}{\bar{L}_{f \text{ ад}}}, \quad (2)$$

причем отношение модулей упругости к величине относительно вклада ξ остается постоянной величиной вне зависимости от величины нагрузки, а уровень величины относительно вклада ξ тем больше, чем больше отношение модулей упругости (см. таблицу).

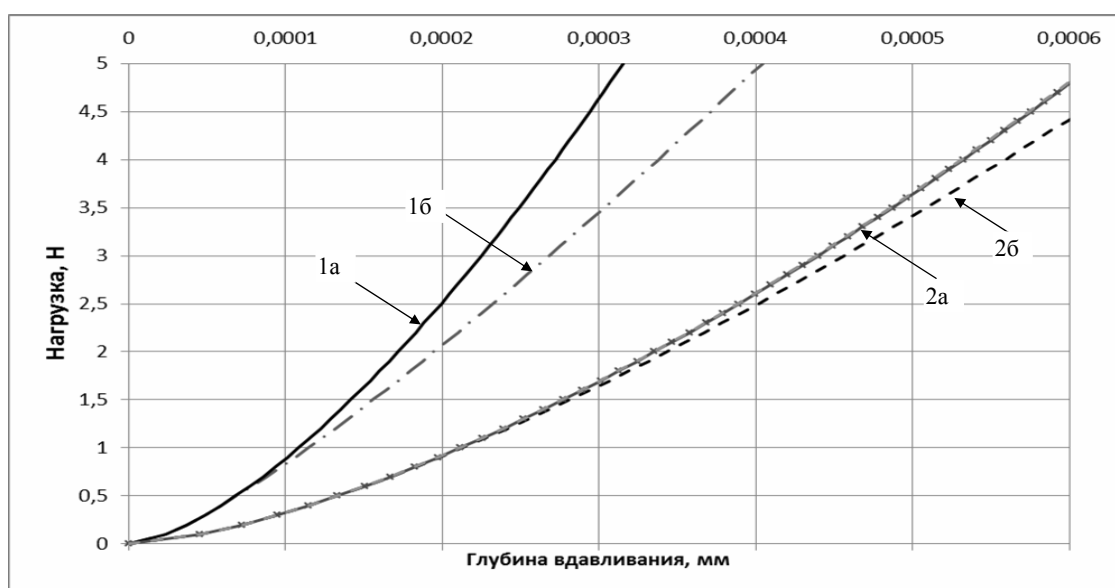


Рис. 6. Зависимость глубины вдавливания от нагрузки, измеренная по перемещению, для материала 08X18H10T: 1а – нижней точки шара для упругого случая; 1б – нижней точки шара для упруго-пластического случая; 2а – верхней точки шара для упругого случая; 2б – верхней точки шара для упруго-пластического случая

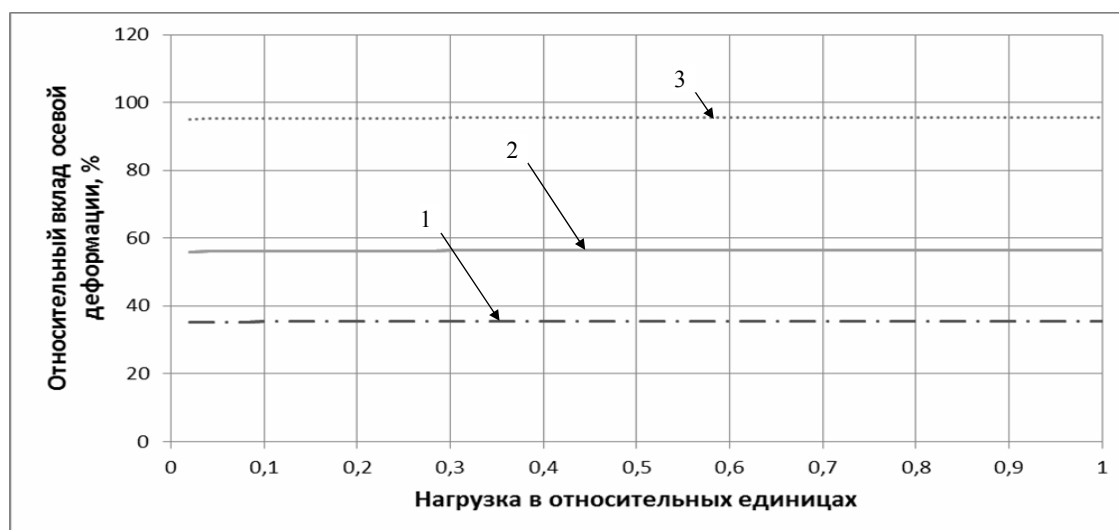


Рис. 7. Относительная осевая деформация шара при решении упругой задачи:

1 – алюминиевый сплав АМГ-61; 2 – титан ВТ1; 3 – сталь 08Х18Н10Т

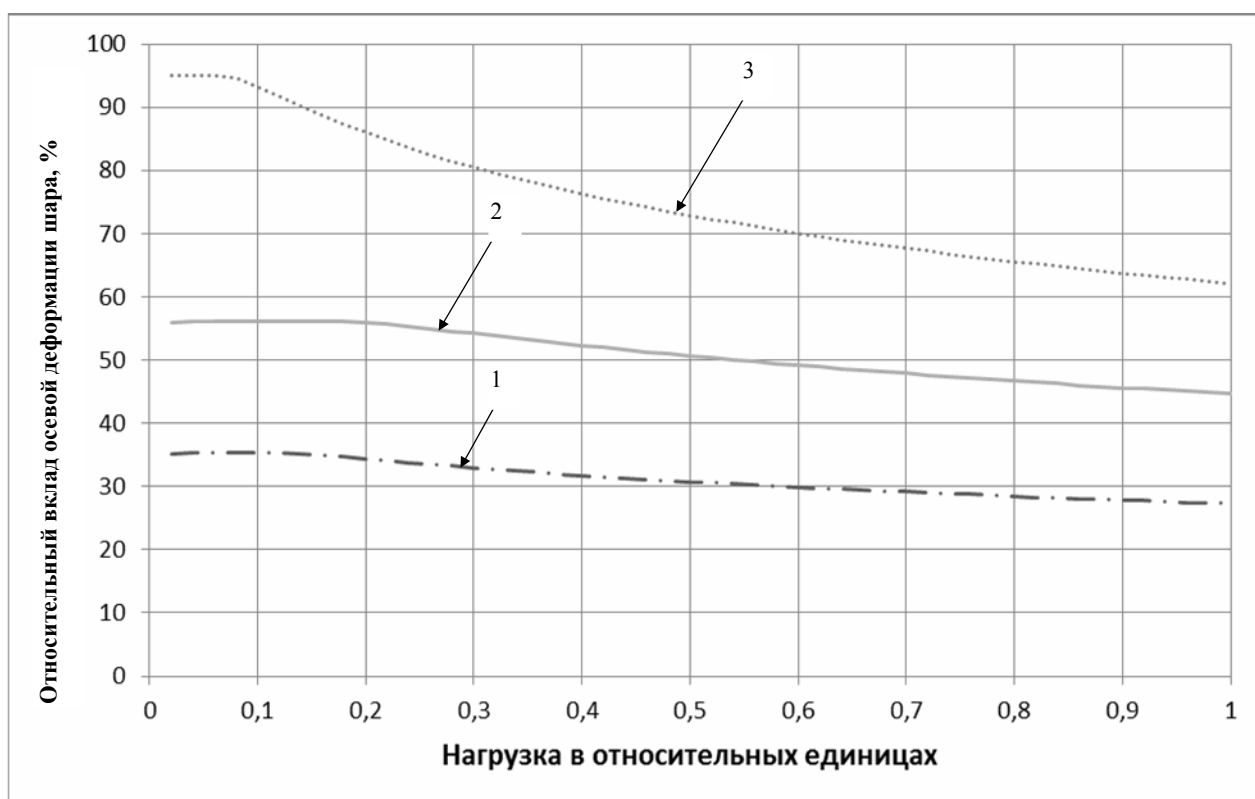


Рис. 8. Относительная осевая деформация шара при решении упругопластической задачи:
1 – алюминиевый сплав АМГ-61; 2 – титан BT1; 3 – сталь 08X18H10T

Влияние величины модуля упругости E на относительный вклад осевой деформации шара ξ в величину измеряемой глубины вдавливания h_B

Наименование материала	Модуль упругости E , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительный вклад ξ , %	$E_{обр}/E_{шара}$ при $E_{шара} = 206\,000$ МПа
АМГ-61	71 000	240	35	0,3447
BT1	112 100	420	55	0,5442
08X18H10T	196 000	196	95	0,9515

При переходе контакта в упруго-пластическое состояние величина относительного вклада ξ постепенно снижается, достигая в конце процесса нагружения величины в 27, 44 и 62 % соответственно.

Таким образом, в натурном эксперименте на твердом теле, если производить измерения глубины вдавливания шара в максимально удобной для этого верхней точке шара, получаемые результаты будут иметь значительный уровень погрешности. Реальную глубину вдавливания шарового индентора можно оценить по формуле

$$h_H = \left(1 + \frac{\xi}{100}\right) \cdot h_B, \quad (3)$$

где ξ – вклад осевой деформации шара; h_B – глубина вдавливания, измеряемая с помощью прибора.

Анализ результатов (рис. 7, 8) позволяет сделать вывод о линейной зависимости относительной осевой деформации шара от нагрузки в пределах упругой деформации.

При этом оказалось, что эта величина пропорциональна отношению модулей упругости образца и ша-

ра (см. таблицу). Зная модули упругости образца и шара, мы можем достаточно точно определить вклад осевой деформации шара в величину глубины вдавливания шара по формуле (2) и найти реальную глубину вдавливания шарового индентора по формуле (3).

Заключение. На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что предлагаемое устройство благодаря оригинальности конструкции позволяет определять глубину вдавливания шарового индентора в исследуемый образец по наиболее удобной для этого верхней точке шара, а вклад осевой деформации определять по формуле (3).

Библиографические ссылки

1. Шабанов В. М. К исследованию распределения контактных напряжений при непрерывном упруго-пластическом вдавливании сферического индентора // Заводская лаборатория. 2003. № 1. С. 41–45.
2. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М. : Машиностроение, 1985. 223 с.

3. Дрозд М. С. Определение механических свойств материала без разрушения. М. : Metallurgia, 1965. 172 с.
4. Теребушко О. И. Основы теории упругости. М. : Наука, 1984. 320 с.
5. Шабанов В. М. Деформирование металлов при непрерывном вдавливании сферического индентора // Заводская лаборатория. 1993. № 12. С. 36–39.
6. Brinell I. A. Ein Verfahren zur Härtebestimmung. Baumaterialkunde, 1900. P. 18–26.
7. Пат. 2320974 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/42. Измерительная головка к твердомеру Бринелля / Автономов Н. Н., Тололо А. В. Заявл. 05.01.2001 ; опубл. 27.03.2008.
8. Haggag F. M. In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System // Server, Eds. ; American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1993. Pp. 27–44.
9. Болдырев Ю. Г. Новые приборы для измерения твердости материалов // Заводская лаборатория. 1990. № 5. С. 68–72.
10. Пат. 4852397 США, МПК G 01 N 3/42. Field indentation microprobe for structural integrity evaluation / Haggag F. M. Заявл. 15.01.88 ; опубл. 15.03.89.
11. Автономов Н. Н., Тололо А. В. Измерительная головка к твердомеру Бринелля // Вестник СибГАУ. 2007. № 2. С. 73–76.
12. Басов К. А. ANSYS в руках инженера. М. : КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
13. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров : справ. пособие М. : Машиностроение-1, 2004. 512 с.
14. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М. : Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
15. Решение контактных задач в Ansys 6.1. М. : Cadfem. 2003. 127 с.
3. Drozd M. S. *Opređenje mehanicheskih svoystv materiala bez razrushenia* [Mechanical properties determination without destruction]. Moscow, Metalurgia Publ., 1965.
4. Terebushko O. I. *Osnovy teorii uprugosti* [Theory of elasticity foundations]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p.
5. Shabanov V. M. [Metal deformation by spherical indenter continuous indentation], *Zavod. lab.* 1993, No. 12, P. 36–39 (In Russ.).
6. Brinell I. A. Ein Verfahren zur Härtebestimmung, Baumaterialkunde, 1900, P. 18–26.
7. Avtonomov N. N., Tololo A. V. *Izmeritelnaya golovka k tverdomeru Brinelya* [Measuring head for Brinell's durometer]. Patent RF, no. 2320974, 2008.
8. Haggag F. M. In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System, *Server, Eds., American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1993, P. 27–44.
9. Boldurev U. G. [New devices for material hardness measuring]. *Zavod. lab.* 1990, No. 5, P. 68–72 (In Russ.).
10. Haggag F. M. Field indentation microprobe for structural integrity evaluation. Pat. USA no. 4852397 USA, 1989.
11. Avtonomov N. N., Tololo A. V. [Measuring head for Brinell's durometer]. *Vestnik SibGAU*, 2007, No. 2 (15), P. 73–76.
12. Basov K. A. *ANSYS v rukakh inzhenera* [ANSYS in the hands of the engineer]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2002, 224 p.
13. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. *ANSYS dlja inzhenerov. Spravochnoe posobie* [ANSYS to engineers. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 512 p.
14. Kaplun A. B., Morozov E. M. Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukah inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 272 p.
15. *Reshenie kontaktnuh zadach v ansys 6.1.* [Contact problem solution in Ansys 6.1], Moscow, Cadfem Publ., 2003, 127 p.

References

1. Shabanov V. M. [For investigation of contact stress allocation by spherical indenter continuously elastoplastic indentation]. *Zavod. lab.* 2003, No. 1, P. 41–45.
2. Kogaev V. P., Mahutov N. A., Gusenkov A. P. *Raschetu detaley mashin I konstrukciy na prochnost I dolgovechnost* [Machine details and construction calculation for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 223 p.

О ВЫБОРЕ СТРАТЕГИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМИ. И. Вайнштейн^{1*}, Г. Е. Михальченко¹, Ю. В. Вайнштейн¹, К. В. Сафонов²¹ Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: isvain@mail.ru

Исследуется функция интенсивности эксплуатационных затрат стратегии строго периодических восстановлений технических систем в зависимости от времени проведения профилактических восстановлений. Функции распределения времени наработок заменяемых элементов при аварийных и профилактических восстановлениях могут не совпадать. В стратегии строго периодических восстановлений в случае отказа системы проводится аварийное восстановление, а если система проработала без отказа заданный интервал времени, то проводится профилактическое восстановление. Случай совпадения функций распределения при аварийных и профилактических восстановлениях хорошо изучен в математической теории надежности.

При экспоненциальных распределениях (параметры распределений различны) установлена связь между параметрами распределений и стоимостями аварийных и профилактических восстановлений, когда функция интенсивности затрат имеет одну точку минимума. Для этого случая установлен характерный график функции интенсивности затрат. Минимальное значение интенсивности затрат меньше интенсивности затрат стратегии только аварийных восстановлений (в стратегии только аварийных восстановлений профилактические восстановления не проводятся).

В общем случае получено условие на функции распределения времени наработок заменяемых элементов при аварийных и профилактических восстановлениях для выбора проведения рассматриваемой стратегии с несовпадающими или совпадающими функциями распределения по критерию минимума интенсивности эксплуатационных затрат.

Для случая, когда законы распределения наработок на отказ при аварийных и профилактических восстановлениях совпадают, но отличаются параметрами, получены условия для параметров, при которых следует проводить рассматриваемую стратегию с несовпадающими функциями распределений для часто встречающихся в теории надежности законов распределения: экспоненциального, Эрланга порядка n , Вейбулла–Гнеденко, Релея, Максвелла и логарифмически нормального распределения.

Полученные результаты о выборе стратегий эксплуатации технических систем для минимизации интенсивности эксплуатационных затрат рассматриваемой стратегии справедливы для максимизации коэффициента готовности.

Ключевые слова: стратегия восстановления, интенсивность затрат, коэффициент готовности, закон распределения.

ABOUT THE CHOICE OF STRATEGY OF TECHNICAL SYSTEMS OPERATIONI. I. Vainshtein^{1*}, G. E. Mihalchenko¹, J. V. Vainshtein¹, K. V. Safonov²¹ Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation² Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: isvain@mail.ru

The intensity function of exportation expenses for the strategy of strongly periodical systems recovery technology according to the time of carrying out preventive recoveries is investigated. The frequency functions of substitution elements service time under the emergency and preventive recoveries may be not equal. In the strategy of strong periodical recovery in the case of systems crash, the emergency recoveries are carried out, and if the system had worked without a crash for a definite period of time, then preventive recoveries are performed. The case of frequency functions correspondence under the emergency or preventive recoveries is well studied in the mathematical theory of reliability.

For the exponential distribution (where the distribution parameters are different) the correlation was established between the parameters of the distribution and the costs of emergency and preventive recoveries, when the cost intensity function has one minimum point. In this case a characteristic graph of the costs intensity is set. The minimum value of the cost intensity is less than the cost intensity of the strategy of emergency recovery only (for the strategy of purely emergency recovery the preventative recovery is not carried out).

In general, the condition is obtained for the function of time distribution of developments of replaceable elements under emergency and preventive recovery for the choice of the strategy implementation methods under study including equal and different functions of distribution by the criterion of the minimum intensity of the operating costs.

In the case, where the developments distributive laws under failures in emergency and preventive recoveries are identical, but differ in parameters. The conditions are defined for the parameters where the given strategy should be considered with not equal distribution functions for the distribution laws frequently used in the reliability theory, in particular the exponential, Erlang distribution of the n th order, Weibull–Gnedenko, Rayleigh, Maxwell, and the log-normal distribution.

The results of the choice of strategies of technical systems operation in order to minimize the operating costs intensity of the strategy under study are considered to be valid for maximizing the availability factor.

Keywords: recovery strategy, the costs intensity, availability factor, the distribution law.

Введение. В теории надежности стратегия эксплуатации технической системы – это некоторый процесс восстановления, учитывающий различные состояния системы, например, аварийные и профилактические восстановления, а также время, продолжительность и стоимость их проведения [1–15]. Управляя временем проведения профилактических восстановлений, можно по различным критериям оптимизировать стратегии восстановления. Например, при эксплуатации ракетно-космической техники, электронно-вычислительных систем, систем электро-снабжения, теплоснабжения, транспортных систем и многих других требуется близкий к единице коэффициент готовности, так как отказы и время простоя могут приводить к значительным техническим, экологическим, экономическим последствиям.

В работе продолжается исследование введенной авторами в [11] стратегии C_o , в которой функции распределения заменяемых элементов при аварийных и профилактических восстановлениях могут не совпадать, что характерно в реальных условиях эксплуатации. Случай совпадения функций распределения хорошо изучен в теории надежности [3]. В указанной статье рассматривались две стратегии эксплуатации. Стратегия C_a – проводятся только аварийные восстановления; стратегия C_o (стратегия строго периодических восстановлений) – в случае отказа системы проводится аварийное восстановление, а если система проработала без отказа заданный интервал времени τ , то проводится профилактическое восстановление. В качестве критериев оптимальности стратегий были рассмотрены минимум по моменту времени проведения профилактических восстановлений интенсивности эксплуатационных затрат $R(\tau)$ (средние затраты на восстановление в единицу времени) и максимум коэффициента готовности $K(\tau)$. Также решалась задача выбора по этим двум критериям оптимальной из стратегий C_a и C_o .

Пусть $F_a(t)$ и $F_p(t)$ – функции распределения наработок на отказ после каждого аварийного и профилактического восстановления соответственно. Время восстановления не учитывается. Получено аналитическое представление функций $R(\tau)$ и $K(\tau)$:

$$R(\tau) = \frac{c_a F_p(\tau) + \dot{n}_p \bar{F}_a(\tau)}{F_p(\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}_a(t) dt + \bar{F}_a(\tau) \int_0^{\tau} F_p(t) dt}, \quad (1)$$

$$K(\tau) = \frac{1}{R_1(\tau) + 1}, \quad (2)$$

где c_a и c_p – средние затраты на аварийное и профилактическое восстановление соответственно; $R_1(\tau)$ совпадает с функцией интенсивности затрат, если в ней c_a и c_p заменить на T_a и T_p – среднее время, затраченное на аварийное и профилактическое восстановление соответственно. Из (2) следует, что максимум коэффициента готовности достигается в точке минимума функции $R_1(\tau)$.

В случае, когда наработки после аварийных и профилактических восстановлений распределены по экспоненциальным законам

$$F_a(t) = 1 - e^{-at}, \quad F_p(t) = 1 - e^{-pt}, \quad a, p > 0, \quad (3)$$

было показано, что при выполнении неравенства

$$k < 1/(1 + \dot{n}), \quad c = c_p / c_a, \quad k = p / a \quad (4)$$

для стратегии C_o имеется оптимальное время проведения профилактики, при котором интенсивность эксплуатационных затрат меньше интенсивности затрат стратегии C_a только аварийных восстановлений. Кроме того, показано, что при $p = a$ ($F_a(t) = F_p(t)$) профилактики проводить нецелесообразно, и оптимальна стратегия только аварийных восстановлений.

Из равенства (2) следует, что при выполнении неравенства

$$k < 1/(1 + d), \quad d = T_p / T_a,$$

аналогичного неравенству (4), при значении τ^* , дающего минимум функции $R_1(\tau)$, достигается максимум функции $K(\tau)$ – коэффициента готовности.

Исследование функции интенсивности эксплуатационных затрат. Определим условия, при которых в случае выполнения неравенства (4)

и экспоненциальных распределений наработок на отказ после аварийных и профилактических восстановлений функция интенсивности затрат $R(\tau)$ имеет единственную точку минимума. Ее график представлен на рис. 1, где $R_a = c_a / \mu$ – интенсивность затрат стратегии аварийных восстановлений (профилактики не проводятся), $\mu = \int_0^{\infty} \bar{F}_a(t) dt$ – средняя наработка до отказа.

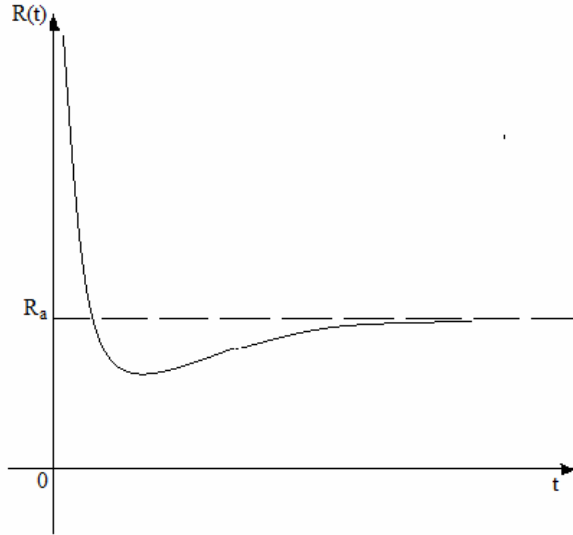


Рис. 1. График функции интенсивности эксплуатационных затрат

Пусть наработки распределены по экспоненциальным законам (3), тогда имеем [11]

$$R(\tau) = apc_a \frac{F_p(\tau) + c\bar{F}_a(\tau)}{F_p(\tau)(pF_a(\tau) + a\bar{F}_a(\tau))},$$

$$R'(\tau) = apc_a \frac{\bar{F}_a(\tau)y(\tau)}{(F_p(\tau))^2 (pF_a(\tau) + a\bar{F}_a(\tau))^2},$$

где

$$y(\tau) = -capF_p(\tau) + (a^2 - ap)F_p^2(\tau) - cp^2\bar{F}_p(\tau)F_a(\tau) - acp\bar{F}_p(\tau)\bar{F}_a(\tau), \quad c = c_a/c_a.$$

Заметим, что знак производной $R'(\tau)$ при $\tau > 0$ совпадает со знаком $y(\tau)$. Имеем

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} y(\tau) = -acp < 0, \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} y(\tau) = (-cp + a - p)a. \quad (5)$$

Пусть выполнено неравенство $-cp + a - p > 0$ или равносильное ему неравенство (4). Тогда из непрерывности функции $y(\tau)$ следует, что в некоторой точке τ^* ($0 < \tau^* < \infty$) она, и вместе с ней производная функции интенсивности затрат, обращаются в ноль.

Вычислим $y'(\tau)$. Так как $F_p'(\tau) = p\bar{F}_p(\tau)$, $F_a'(\tau) = a\bar{F}_a(\tau)$, $\bar{F}_a'(\tau) = -a\bar{F}_a(\tau)$, $k = p/a$, то

$$y'(\tau) = a^2 (ckp\bar{F}_p(\tau) + 2p(1-k)F_p(\tau)\bar{F}_p(\tau) - ck^2(-p\bar{F}_p(\tau)F_a(\tau) + a\bar{F}_p(\tau)\bar{F}_a(\tau))) =$$

$$-ck(-p\bar{F}_p(\tau)\bar{F}_a(\tau) + a\bar{F}_p(\tau)\bar{F}_a(\tau)) =$$

$$= a^3 k\bar{F}_p(\tau) (-ck + 2(1-k)F_p(\tau) + F_a(\tau)ck^2 + c\bar{F}_a(\tau)).$$

Обозначим

$$H(\tau) = -ck + 2(1-k)F_p(\tau) + F_a(\tau)ck^2 + c\bar{F}_a(\tau),$$

тогда

$$y'(\tau) = a^3 k\bar{F}_p(\tau)H(\tau),$$

и знак $y'(\tau)$ определяется знаком функции $H(\tau)$.

Имеем

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} H(\tau) = c(1-k), \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} H(\tau) = (1-k)(2-ck).$$

Из (4) следует, что $k < 1$, и при выполнении неравенства $c < 2/k$ получаем

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} H(\tau) > 0, \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} H(\tau) > 0.$$

Далее исследуем функцию $H(\tau)$ на экстремум:

$$H'(\tau) = 2p(1-k)\bar{F}_p(\tau) + ck^2 a\bar{F}_a(\tau) - ca\bar{F}_a(\tau) =$$

$$= a(1-k)(2k\bar{F}_p(\tau) - c(1+k)\bar{F}_a(\tau)).$$

Приравняем $H'(\tau)$ к нулю. Имеем:

$$2k\bar{F}_p(\tau) - c(1+k)\bar{F}_a(\tau) = 0.$$

Отсюда с учетом равенств $\bar{F}_a(\tau) = 1 - F_a(\tau) = e^{-a\tau}$ получаем $2ke^{-p\tau} = c(1+k)e^{-a\tau}$, или $(p-a)\tau = \ln(2k/c(1+k))$. Так как $p < a$, то $(p-a)\tau < 0$. Если потребовать выполнения условия $\ln(2k/c(1+k)) > 0$, то $H'(\tau)$ не обращается в ноль на промежутке $[0, \infty)$, и тем самым функция $H(\tau)$ не имеет на этом промежутке экстремума, а так как в нуле и на бесконечности она положительна, то она положительна на всем промежутке $[0, \infty)$.

Таким образом, при выполнении неравенств

$$2k/c(1+k) > 1 \quad \text{и} \quad k < 1/(1+c) \quad (6)$$

на промежутке $[0, \infty)$ функция $y'(\tau) > 0$, $y(\tau)$ возрастает. Отсюда следует, что только в одной точке $R'(\tau)$ обращается в ноль, и в этой точке функция интенсивности затрат имеет минимум (производная при ее переходе меняет знак с минуса на плюс).

Учитывая, что прямая $R(\tau) = R_a$ является горизонтальной асимптотой графика функции $R(\tau)$ ($\lim_{\tau \rightarrow \infty} R(\tau) = R_a$) и что ее предел в нуле равен бесконечности, заключаем, что график функции интенсивности затрат стратегии C_i имеет вид, представленный на рис. 1. На рис. 2 выделена штриховкой область, удовлетворяющая неравенствам (6), где $A(\sqrt{3}-1, \sqrt{3}/3)$.

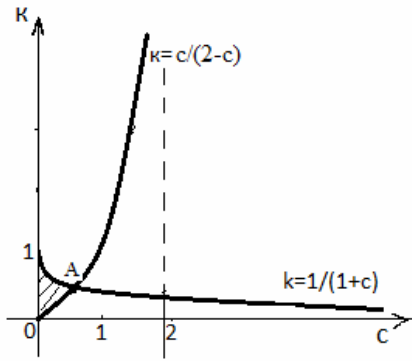


Рис. 2. Область, удовлетворяющая неравенствам (6)

Стратегия C_c , сравнение стратегий C_o и C_c . Стратегия C_c определяется как стратегия C_o , в которой функции распределения наработок на отказ после профилактики и после аварийного восстановления совпадают: $F_p(t) = F_a(t)$ [3]. Функция $R_c(\tau)$ интенсивности затрат для стратегии C_c имеет вид [3]

$$R_c(\tau) = \frac{c_a F_a(\tau) + c_p \bar{F}_a(\tau)}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt}.$$

Сравним интенсивности затрат стратегий C_o и C_c . Пусть для всех $t \geq 0$

$$F_p(t) \leq F_a(t) \quad (\bar{F}_p(t) \geq \bar{F}_a(t)). \quad (7)$$

Неравенство (7) означает, что на любом промежутке времени $[0, t]$ вероятность отказа заменяемого элемента после профилактического восстановления не превышает соответствующую вероятность отказа после аварийного восстановления.

Обозначим

$$\varphi(\tau) = \frac{\int_0^\tau \bar{F}_p(t) dt}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt}, \quad \tau > 0.$$

Из (7) следует, что

$$\varphi(\tau) \geq 1, \quad \tau > 0. \quad (8)$$

Для разности интенсивностей затрат стратегий C_o и C_c , с учетом (8), имеем

$$\begin{aligned} R_o(\tau) - R_c(\tau) &= \\ &= \frac{c_a}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt} \left[\frac{F_p(\tau) + c \bar{F}_a(\tau)}{F_p(\tau) + \varphi(\tau) \bar{F}_a(\tau)} - \frac{F_a(\tau) + c \bar{F}_a(\tau)}{1} \right] \leq \\ &\leq \frac{c_a}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt} \left[\frac{F_p(\tau) + c \bar{F}_a(\tau)}{F_p(\tau) + \bar{F}_a(\tau)} - \frac{F_a(\tau) + c \bar{F}_a(\tau)}{1} \right] = \\ &= \frac{c_a}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\times \left[\frac{F_p(\tau) \bar{F}_a(\tau) + c \bar{F}_a(\tau) \bar{F}_p(\tau) - \bar{F}_a(\tau) (F_a(\tau) + c \bar{F}_a(\tau))}{F_p(\tau) + \bar{F}_a(\tau)} \right] = \\ &= \frac{c_a \bar{F}_a(\tau)}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt} \left[\frac{F_p(\tau)(1-c) - F_a(\tau)(1-c)}{F_p(\tau) + \bar{F}_a(\tau)} \right] = \\ &= \frac{c_a \bar{F}_a(\tau)}{\int_0^\tau \bar{F}_a(t) dt} \left[\frac{(1-c)(F_p(\tau) - F_a(\tau))}{F_p(\tau) + \bar{F}_a(\tau)} \right]. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что если $F_p(\tau) \leq F_a(\tau)$ при всех $\tau > 0$, то $R_o(\tau) \leq R_c(\tau)$.

Сформулируем полученный результат: если при всех $t \geq 0$

$$F_p(t) \leq F_a(t),$$

то следует предпочесть стратегию C_o (по сравнению со стратегией C_c).

Пусть в стратегии C_o законы распределения наработок на отказ при аварийных и профилактических восстановлениях совпадают, но отличаются параметрами. Получим условия для параметров, входящих в функции распределения $F_p(t)$ и $F_a(t)$, при которых выполняется неравенство (7), для часто встречающихся в теории надежности законов распределения.

Далее параметры, входящие в функции распределения и относящиеся к аварийным восстановлениям, имеют нижний индекс a , а относящиеся к профилактическим восстановлениям – нижний индекс p .

1. Экспоненциальное распределение:

$$F(t, \alpha) = 1 - e^{-\alpha t}, \quad \alpha > 0, \quad F'_\alpha(t) = t e^{-\alpha t} \geq 0 \quad \text{при } t \geq 0.$$

Следовательно, неравенство (7) выполняется при $\alpha_p \leq \alpha_a$.

2. Распределение Максвелла:

$$F(t, h) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(-h t e^{-h^2 t^2} + \int_0^{ht} e^{-z^2} dz \right),$$

$$h > 0, \quad t \geq 0, \quad F'_h(t, h) = \frac{4h^2}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 t^2} > 0.$$

Неравенство (7) выполняется при $h_p \leq h_a$.

3. Распределение Эрланга порядка n :

$$F(t, \alpha, n) = 1 - e^{-\alpha t} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha t)^k}{k!}, \quad \alpha > 0,$$

$$F'_\alpha(t, \alpha, n) = \frac{e^{-\alpha t} t (\alpha t)^{n-1}}{(n-1)!} \geq 0, \quad F(t, \alpha, n+1) \leq F(t, \alpha, n).$$

При $n_a = n_p$ неравенство (7) выполняется при $\alpha_p \leq \alpha_a$, при $\alpha_p = \alpha_a$ неравенство (7) выполняется при $n_p \geq n_a$.

4. Распределение Релея:

$$F(t, \sigma) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \quad t \geq 0, \quad F'_\sigma(t, \sigma) = -\frac{t^2}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \leq 0.$$

Неравенство (7) выполняется при $\sigma_p \geq \sigma_a$.

5. Распределение Вейбулла–Гнеденко:

$$F(t, \theta, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}, \quad \theta > 0, \quad \beta > 0,$$

$$F'_\theta(t, \beta, \alpha) = -\beta t^{\beta-1} \theta^{-(\beta+1)} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \leq 0.$$

При $\beta_a = \beta_p$ неравенство (7) выполняется при $\theta_p \geq \theta_a$.

6. Гамма-распределение:

$$F(t, \alpha, \beta) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\alpha t} x^{\beta-1} e^{-x} dx, \quad \alpha, \beta > 0,$$

$$F'_\alpha(t, \alpha, \beta) = \frac{t}{\Gamma(\beta)} (\alpha t)^{\beta-1} e^{-\alpha t} \geq 0,$$

$$\Gamma(\beta) = \int_0^\infty x^{\beta-1} e^{-x} dx - \text{гамма-функция.}$$

При $\beta_a = \beta_p$ неравенство (7) выполняется при $\alpha_p \leq \alpha_a$.

7. Логарифмически нормальное распределение:

$$F(t, \mu, \sigma) = \hat{O} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right), \quad t > 0,$$

где

$$\hat{O}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt,$$

$$F'_\mu(t, \mu, \sigma) = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} < 0.$$

При $\sigma_p = \sigma_a$ неравенство (7) выполняется при $\mu_p \geq \mu_a$.

Заключение. Полученные результаты по минимизации интенсивности затрат рассматриваемой стратегии с проведением профилактических восстановлений можно использовать для максимизации коэффициента готовности, что очень важно, как указывалось во введении, при эксплуатации особо важных технических и электронно-вычислительных систем.

По времени проведения профилактических восстановлений имеются и другие стратегии восстановления. Например, стратегия восстановления блоками, когда в заранее заданные моменты времени $\tau, 2\tau, \dots$ после начала эксплуатации проводятся профилактические восстановления. Величина τ задается в [11]. Заранее определенное время проведения профилактики может приводить к замене дорогостоящего элемента, если перед этим произошло близкое по времени его аварийное восстановление. Таким недостатком рассматриваемая в работе стратегия не обладает. Недостатком этой стратегии является заранее неизвестное время проведения профилактических восстановлений, если для их проведения требуется значительное время или средства. В связи с этим следует исследовать различные стратегии и затем выбрать из них оптимальные.

В работе решена задача о выборе оптимальной стратегии из двух стратегий: стратегии C_o , определенной авторами, и стратегии C_a только аварийных восстановлений, по критериям минимума интенсивности затрат и коэффициента готовности для законов распределений, часто встречающихся в теории надежности, таких как экспоненциальное, Эрланга порядка n , Вейбулла–Гнеденко и др.

Библиографические ссылки

1. Smith W. L. Renewal theory and its ramifications // J. Roy. Statist. Soc. Ser. B 20. P. 243–302.
2. Vainshtein I. I., Mikhail'chenko G. E., Vainshtein V. I. Optimizing the replacement order to minimize the mean number of system faults // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2012. Vol. 41, iss. 5. P. 417–421.
3. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход : пер. с нем. М. : Радио и связь, 1988. 392 с.
4. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М. : Сов. радио, 1971. 272 с.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности : пер. с англ. М. : Сов. радио, 1969. 488 с.
6. Вайнштейн В. И. Математическое и программное обеспечение оптимизации проведения профилактических восстановлений при эксплуатации электронно-вычислительных систем : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2006. 22 с.
7. Герцбах И. Теория надежности (с приложениями к профилактическому обслуживанию). М. : Нефть и газ, 2003. 263 с.
8. Голодников А. Н., Стойкова Л. С. Определение оптимального периода предупредительной замены на основе информации о математическом ожидании и дисперсии времени безотказной работы системы // Кибернетика. 1978. № 3. С. 110–118.
9. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. М. : Физматлит, 2010. 606 с.
10. Надежность технических систем: справочник / Р. Барлоу [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. М. : Радио и связь, 1985. 606 с.
11. Оптимизация стратегий эксплуатации технических систем с проведением аварийных и профилактических восстановлений / И. И. Вайнштейн [и др.] // Вестник СибГАУ. 2014. № 2 (54). С. 20–25.
12. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Планирование системы технического обслуживания // Вестник СибГАУ. 2006. № 6. С. 66–70.
13. Посеренин С. П. Теоретические основы стратегий технического обслуживания машин и технологического оборудования : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2005. 39 с.
14. Северцев Н. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке. М. : Высш. шк., 1989. 432 с.
15. Сугак Е. В. Надежность технических систем : учеб. пособие для техн. специальностей вузов / под общ. ред. Е. В. Сугака и Н. В. Василенко. Красноярск : НИИ СУВПТ ; МГП «Раско», 2001. 608 с.

References

1. Smith W. L. Renewal theory and its ramifications. *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B* 20, 1958, P. 243–302.
2. Vainshtein I. I., Mikhail'chenko G. E., Vainshtein V. I. Optimizing the replacement order to minimize the mean number of system faults. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, September 2012, Vol. 41, Iss. 5, P. 417–421.
3. Bayhelt F., Franken P. *Nadezhnost' i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskii podkhod*. [Reliability and Maintenance. Mathematical approach]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 392 p.
4. Barzilovich E. U., Kashtanov V. A. *Nekotorye matematicheskie voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh system*. [Some mathematical questions of the theory of complex systems maintenance]. Moscow, Sov. radio Publ., 1971, 372 p.
5. Barlow R., Proschan F. *Mathematical theory of reliability*. New York: J. Wiley & Sons, 1965, 488 p.
6. Vainshtein V. I. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie optimizatsii provedeniya profilakticheskikh vosstanovleniy pri ekspluatatsii elektronno-vychislitel'nykh system. Diss. kand. fiz.-mat. nauk*. [Mathematical and software support of optimization of preventive recovery during the electronic computing systems operation. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2006, 22 p.
7. Gercbah I. *Teoriya nadezhnosti (s prilozheniyami k profilakticheskomu obsluzhivaniyu)*. [Theory of reliability (with applications to preventive maintenance)]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003, 263 p.
8. Golodnikov A. N., Stoykova L. S. [Determination of the optimal warning replacement period based on information about the mathematical expectation and variance system uptime]. *Kibernetika*, 1978, Vol. 3, P. 110–118.
9. Kashtanov V. A., Medvedev A. I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh system*. [The reliability theory of complex systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 606 p.
10. Barlow R. et al. *Nadezhnost' tekhnicheskikh system*. [Reliability of Technical Systems: Directory]. Radio i svyaz' Publ., 1985, 606 p.
11. Vainshtein I. I., Mihalchenko G. E., Vainshtein J. V., Safronov K. V. [Operation of technical systems strategies optimization with the emergency and preventive recovery]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2 (54), P. 20–25 (In Russ.).
12. Okladnikova E. N., Sugak E. V. [Planning of maintenance system]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 6 (13), P. 66–70 (In Russ.).
13. Poserenin S. P. *Teoreticheskie osnovy strategiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya mashin i tekhnologicheskogo oborudovaniya. Diss. dokt. tekhn. nauk*. [Theoretical Foundations strategies maintenance of machinery and technological equipment. Dr. Technical sci. diss.]. Moscow, 2005, 39 p.
14. Severcev N. A. *Nadezhnost' slozhnykh sistem v ekspluatatsii i obrabotke*. [Reliability of complex systems in operation and processing]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 432 p.
15. Sugak E. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem*. [Reliability of Technical Systems]. Ed. E. V. Sugak and N. V. Vasilenko. Krasnoyarsk, NII SUVPT, MGP "Rasko" Publ., 2001, 608 p.

© Вайнштейн И. И., Михальченко Г. Е.,
Вайнштейн Ю. В., Сафонов К. В., 2015

**РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
СПЕКТРА, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРОВ С ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ**

С. А. Веселков*, Е. О. Горбатюк, Н. М. Кузакова, А. В. Заварзина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: pulsar1963@yandex.ru

Рассмотрены возможности обнаружения малоразмерных пожаров с геостационарной орбиты (ГСО) с использованием оптических систем, работающих в ИК-диапазоне.

Согласно статистике 93 % всех лесных пожаров возникает в 10-километровой пригородной зоне, а значит, по вине местного населения. Сильные пожары от удара молнии случаются крайне редко, примерно в 2 % случаев, поскольку грозы, как правило, сопровождаются дождем. Поэтому представляется крайне важным осуществлять постоянное наблюдение именно южных районов края, где проживает подавляющее количество населения. С помощью специальной оптимизирующей программы CODE V был численно исследован оптический широкоугольный телескоп. Использование светосильной оптической системы $f/1,5$ позволило на ПЗС-матрице размером $8k \times 8k$ получить пространственное разрешение до 200 м на пиксель с ГСО. Оптическая система представляет собой систему прямого фокуса с трехлинзовым корректором в сходящемся пучке. Все поверхности линз и главное зеркало имеют асферические поверхности. Приведены конструктивные параметры и графики качества изображения.

Существует возможность вести практически непрерывный мониторинг больших участков земной поверхности на предмет поиска пожаров малого размера – 1–2 га (если разместить рассчитанную оптическую систему на геостационарной орбите).

Ключевые слова: оптическая система, абберрационный расчет, обнаружение пожаров из космоса, ИК-диапазон.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 651–657**CALCULATION OF OPTICAL SYSTEMS FOR THE INFRARED SPECTRAL RANGE USED
FOR THE DETECTION OF SMALL POCKETS OF FIRE FROM GEOSTATIONARY ORBIT**

S. A. Veselkov*, E. O. Gorbatyuk, N. M. Kuzakova, A. V. Zavarzina

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: pulsar1963@yandex.ru

The article discusses the possibility of detection of small fires from geostationary orbit, using optical systems operating in the IR-range.

In the time of the scientific and technological revolution, forest protection has become one of the most pressing issues. Forest fires are a powerful natural and anthropogenic factor which significantly alters the function and condition of the forest.

Forest fires cause damage to the environment, the economy, and often lives are under threat.

According to statistics, 93 % of all forest fires are a 10-kilometer suburban area, which means that they are the fault of the local population. Strong fires from lightning are rare, approximately 2 % of cases as a thunderstorm is usually accompanied by rain. Therefore, it is extremely important to continuously follow precisely the southern districts of the region, home to the vast number of people. With the help of a special optimization program CODE V, the optical wide-angle telescope was numerically investigated. Using a high-aperture optical system $f/1,5$, allowing the CCD-matrix size $8k \times 8k$, get a spatial resolution of 200 m per pixel from GSO. The optical system is a system of direct focus with three-lens corrector in a converging beam. All surfaces of the lens and the main mirror are aspherical surfaces. Given are the design parameters and the quality of graphics images.

There is a possibility to conduct almost continuous monitoring of large areas of the earth surface for the search of small fires – up to 1–2 hectares if you put the calculated optical system in geostationary orbit.

Keywords: optical system aberration calculation, the detection of fires from space, IR-range.

Введение. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса в оптическом диапазоне длин волн позволяет получить информацию как о географических и геофизических параметрах Земли, так и о техногенных процессах, происходящих на ее поверхности [1].

В зависимости от решаемых задач ДЗЗ осуществляется методами маршрутной, объектовой, стереоскопической, статической, динамической, топографической и спектрометрической съемки. В оптическом диапазоне ДЗЗ выполняется с помощью оптико-цифровых систем и комплексов, устанавливаемых на борту космических аппаратов (КА).

Для повышения достоверности данных, получаемых при дистанционном зондировании Земли, необходимо получать информацию в различных участках спектра, также в процессе съемки необходимо учитывать состояние атмосферы, что требует введения специальных датчиков и обуславливает дополнительную нагрузку на служебные системы. Одним из параметров атмосферы является ее коэффициент пропускания [2; 3]. Непрозрачность атмосферы определяется поглощением и рассеянием излучения на молекулах и атомах (рис. 1).

Окна прозрачности земной атмосферы в оптическом диапазоне таковы:

- видимый спектр и ближний ИК-диапазон: от 0,4 до 1,4 мкм;
- ближний инфракрасный диапазон, или ИК I: от 1,4 до 1,9 мкм и от 1,9 до 2,7 мкм;
- средний инфракрасный диапазон, или ИК II: от 2,7 до 4,3 мкм и от 4,5 до 5,2 мкм;
- дальний инфракрасный диапазон, или ИК III: от 8 до 14 мкм;
- удаленный инфракрасный диапазон, или ИК IV: от 16 до 28 мкм.

Для обнаружения лесных пожаров наиболее интересен инфракрасный (ИК) диапазон спектра, например, средний диапазон (ИК II) от 2,7 до 4,3 мкм, где максимум пропускания атмосферы (более 90 %) приходится на участок 3,4–4,2 мкм. Этот интервал наиболее

подходит для систем, регистрирующих изображения объектов с высокой собственной температурой.

Например, спутники Terra и Aqua программы EOS (Earth Observation System), получением и распространением данных с которых занимается ИТЦ «Скан-Экс», имеют в составе бортового оборудования спектрорадиометр MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). Тридцать шесть спектральных каналов охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. При этом очаги возгорания можно дешифровать как визуально, так и, что более важно, автоматизированно, используя яркостные температуры тепловых каналов. Алгоритмы детектирования пожаров в автоматическом режиме основаны на значительной разнице температур земной поверхности (обычно не выше 10–25 °С) и очага пожара (300–900 °С). Почти 100-кратное различие в тепловом излучении объектов фиксируется на снимке, а информация, поступающая с других спектральных каналов, помогает отделить облака [3; 4]. Временное разрешение – 4 раза в сутки. Пространственное разрешение 1 км позволяет выявить очаг пожара площадью 1 га.

Возможность ликвидации пожара на малой площади, особенно в условиях высокой пожарной опасности, определяется оперативностью обнаружения и проведения «первоначальной атаки». Из опыта работы служб Авиалесоохраны известно, что при площади очага менее 5 га ликвидация низового пожара осуществляется с высокой надежностью. Такие пожары ликвидируются десантом из 4–6 человек. Площадь свыше 25 га для одного и даже двух десантов считается критической, и пожар зачастую выходит из-под контроля. Таким образом, наиболее полно требованиям оперативного мониторинга лесных и торфяных пожаров соответствуют спутники с высоким пространственным разрешением и высокой периодичностью [5–7].

На рис. 2 приведена фотография, полученная со спутника SPOT 4, который позволяет получать снимки с пространственным разрешением до 10 м, что значительно лучше, чем результат, полученный со спутников Terra и Aqua.

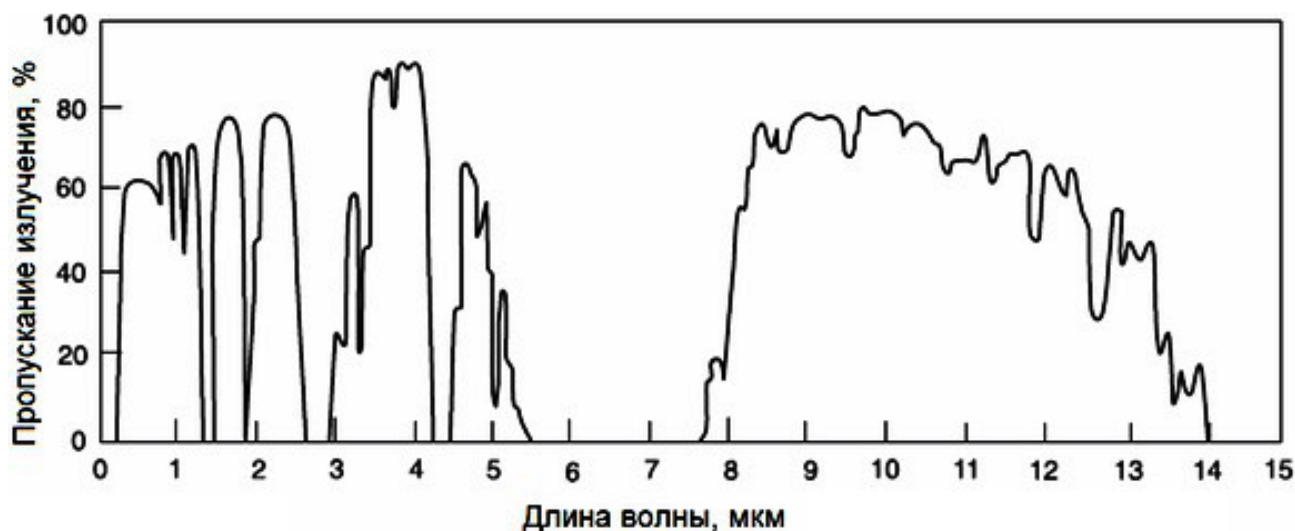


Рис. 1. Светопрозрачность атмосферы из-за молекулярного рассеяния и поглощения на уровне моря

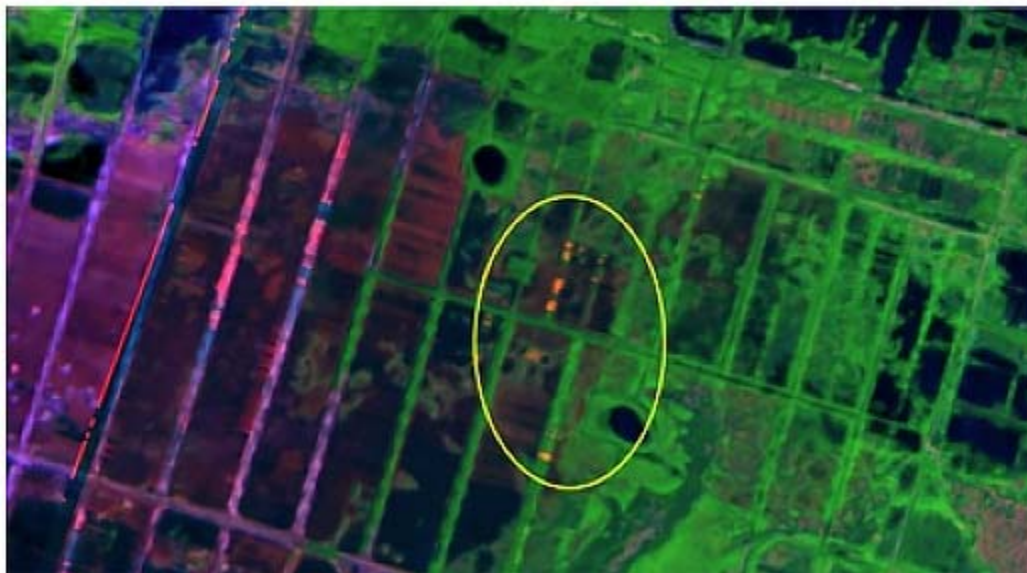


Рис. 2. Очаги торфяных пожаров, Московская область, окрестности п. Радовицы.
Снимок SPOT 4, дата съемки 5 июня 2011 г. (SpotImage, ИТЦ «СканЭкс»)

Площадь лесов Красноярского края, Таймырского и Эвенкийского автономного округов составляет 159 млн га. Леса имеют большую экономическую значимость и являются важным фактором регулирования и стабилизации окружающей среды. В среднем в лесах края ежегодно регистрируется около 1 тыс. пожаров на площади около 100 тыс. га.

В прошлом году от лесных пожаров в крае погибло 18,4 тыс. га леса. Материальный ущерб составил около 300 млн руб. В настоящее время основной объем информации для решения вышеозначенных задач поступает от наземных и авиационных служб охраны лесов. Однако отмечается, что в данных целях перспективно использование космических средств дистанционного зондирования [7].

По площади, охваченной огнём, лесные пожары подразделяются на следующие классы:

- загорание – пожар на площади 0,1–0,2 га;
- малый пожар – пожар на площади 0,2–2 га;
- небольшой пожар – пожар на площади 2,1–20 га;
- средний пожар – пожар на площади 21–200 га;
- крупный пожар – пожар на площади 201–2000 га;
- катастрофический пожар – пожар на площади свыше 2000 га.

Постановка задачи. Периодичность обзора территории с целью обнаружения лесных пожаров и слежения за динамикой их развития с момента наступления и до окончания пожароопасного сезона в светлое время суток в идеале не должна превышать 1 ч, а в ночное время – от 2 до 3 ч. С учетом технических возможностей допустима и меньшая периодичность обзора, поскольку в действующей системе периодичность авиационного наблюдения составляет лишь от 1 до 3 раз в сутки. Идея размещения оптической системы высокого разрешения на геостационарной орбите, работающей в ИК-диапазоне, выглядит заманчивой, так как позволит вести непрерывный мониторинг выбранного участка земной поверхности.

Желательно иметь вероятность обнаружения лесных пожаров площадью до 0,1 га – 80 %, площадью до 0,5 га – 95 % и площадью до 2 га – 99 % [7].

Из этого следует, что необходима оптическая система, имеющая пространственное разрешение не хуже 100 м, обеспечивающая практически непрерывный мониторинг (частота обновления 1 ч) поверхности земли и работающая в ИК-диапазоне.

Результат расчета оптической системы. Используя оптимизирующую программу для расчета оптики CODE V, были рассчитаны несколько вариантов оптических систем. В данной статье приведем одну из них.

Это зеркально-линзовая система прямого фокуса [8–11], где вблизи фокальной плоскости установлен трехлинзовый корректор поля, который обеспечивает поле изображения $2\Omega = 2,5$ градуса. Линейное поле составляет 98 мм в диаметре (рис. 3).

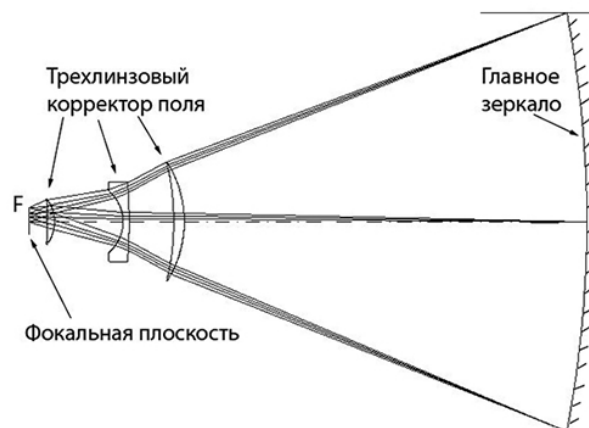


Рис. 3. Оптическая схема ИК-телескопа диаметром 1,5 м

Диаметр главного зеркала оптической системы составляет 1505 мм, относительное отверстие $f/1.5$, фокусное расстояние 2258 мм. Конструктивные данные оптической системы приведены в таблице.

Конструктивные данные для ИК-телескопа с трехлинзовым корректором поля

r , мм	d , мм	Материал	Режим
-3928,0242	-1453,6080	Воздух	Отражение
-401,3850	-38,0226	CaF ₂	Преломление
-921,7921	-160,9680	Воздух	Преломление
-2023,8100	-21,7272	CaF ₂	Преломление
-138,5669	-247,7992	Воздух	Преломление
-144,1072	-27,1590	CaF ₂	Преломление
-5,5833e + 004	-63,9640	Воздух	Преломление

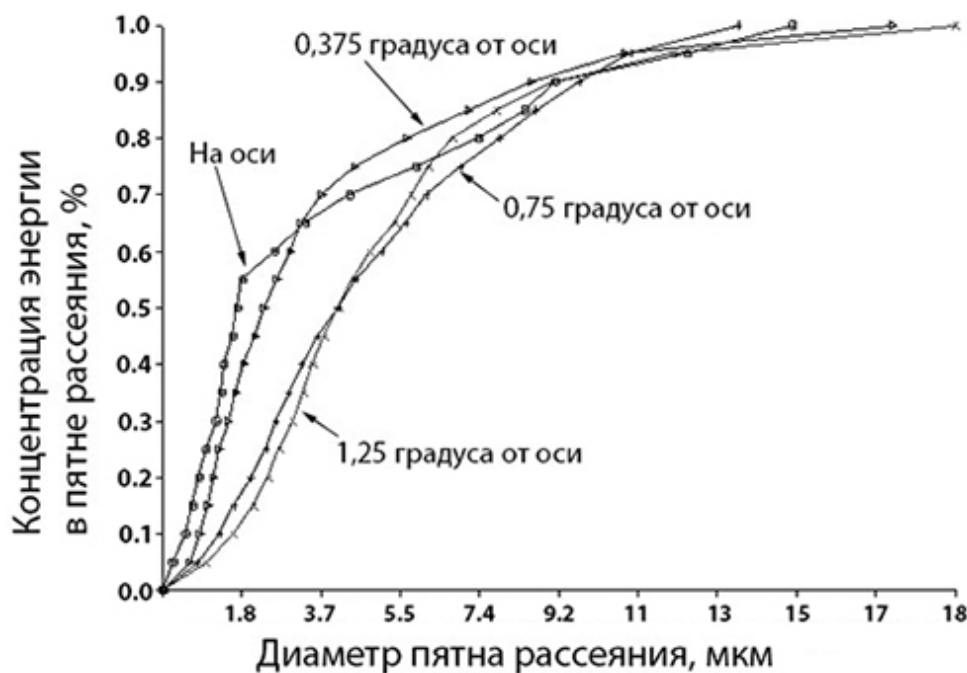


Рис. 4. График концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости

Главное зеркало — достаточно светосильный гиперболоид с эксцентриситетом $i_1^2 = -1,2328$, на который нанесены полиномиальные асферики до 6-го порядка. Все поверхности линз также имеют асферики до 6-го порядка.

Система рассчитывалась для спектрального диапазона $\lambda = 3\text{--}4,2$ мкм. В качестве материала линз был выбран CaF₂. Этот материал обладает выраженной анизотропностью механических свойств. Кальций фтористый используется для производства деталей ультрафиолетовой и инфракрасной микроскопии, оптических окон, линз и призм в ультрафиолетовой и инфракрасной спектроскопии. Область пропускания 0,15–9 мкм. В зависимости от рабочей области спектрального пропускания установлены три марки кальция фтористого: ФК-У, ФК-В, ФК-И. Для выбранного нами спектрального диапазона $\lambda = 3\text{--}4,2$ мкм CaF₂ обладает хорошим светопропусканием. Образец толщиной 10 мм пропускает более 90 % излучения [12].

График концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости представлен на рис. 4, по которому видно, что 80 % энергии попадает в кружок диаметром 7,5 мкм по всему полю изображения. На рис. 5 приведены точечные диаграммы пятен рассеяния для различных углов поля изображения. Мер-

ный отрезок на рис. 5 соответствует 50 мкм. Оптическая система является дифракционно-ограниченной для длины волны $\lambda = 3$ мкм и более.

Диск Эри в нашей системе имеет диаметр

$$\Delta = 2,44 \lambda / A = 2,44 \cdot 3,58 \cdot 1,5 = 13,1 \text{ мкм} [8],$$

или в угловой мере $\Delta'' = \lambda / 2D = 1,19''$, что с расстояния геостационарной орбиты (36 000 км) соответствует 200 м на поверхности Земли, где λ — длина волны света; A — относительное отверстие системы; D — диаметр апертуры.

Приемник ИК-излучения. Сейчас расчет оптических систем нельзя проводить без учета приемников излучения, в данном случае ПЗС-матрицы. Современные светоприемники ИК-диапазона чаще изготавливают из HgCdTe. Изменяя пропорции составных элементов таких светоприемников, можно регулировать их рабочий диапазон. HgCdTe-светоприемники позволяют с достаточно высокой квантовой эффективностью регистрировать ИК-излучение с длиной волны вплоть до 15 мкм. Научное объединение «Рокуэлл» производит различные типы ИК-светоприемников. С 1987 г. сменилось уже несколько поколений светоприемников этой фирмы. Например, в 2006 г. был выпущен детектор HAWAII-6RG — матрица $6k \times 6k$ пикселей с размером пикселя 10 мкм. Название

НАВАИ является аббревиатурой (HgCdTe Astronomical Wide Area Infrared Imager). Сейчас можно заказать матрицу $8k \times 8k$ [13].

Если использовать такую или лучше ИК-матрицу, то разрешение на пиксель составит 200 м. На такой светоприемник 80×80 мм ($8k \times 8k$, пиксель 10 мкм), установленный в фокусе рассчитанной оптической системы, с геостационарной орбиты (ГСО) поместится вся территория Красноярского края (рис. 6).

Таким образом, оптическая система позволяет обнаруживать малые пожары (до 2 га). Чтобы обнаруживать возгорания 0,1–0,2 га, необходим больший телескоп или интерферометр – два одинаковых телескопа, разнесенных на расстояние 10–20 м. Это

позволит повысить разрешающую способность оптической системы на порядок.

Качество получаемых изображений с ГСО.

Общеизвестно, что геометрические характеристики космического снимка ухудшаются при отклонении оптической оси телескопа от надира [14; 15]. Приведем лишь один пример, демонстрирующий зависимость пространственного разрешения GSD (Ground Sample Distance) от угла отклонения от надира (рис. 7).

Нужно выполнять ортотрансформирование снимков. Если рассматривать территорию Красноярского края, то пространственное разрешение южных территорий будет в 2–3 раза лучше разрешения северных территорий.

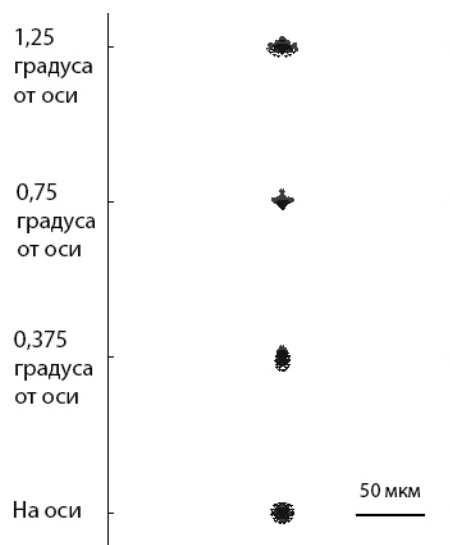


Рис. 5. Вид пятен рассеяния в фокальной плоскости

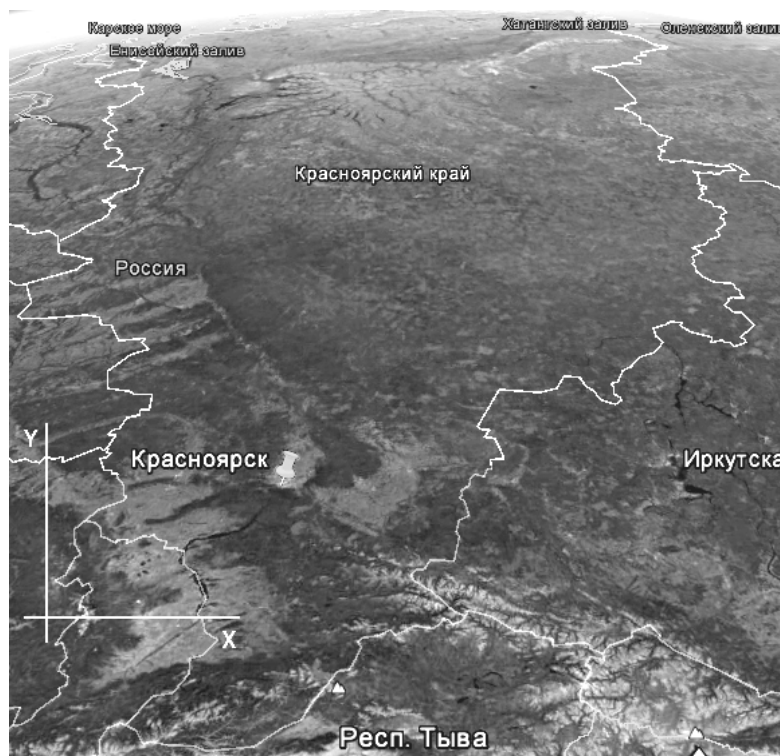


Рис. 6. Вид Красноярского края в проекции на ПЗС-матрицу, размером 80×80 мм, установленную в прямом фокусе рассчитанной оптической системы

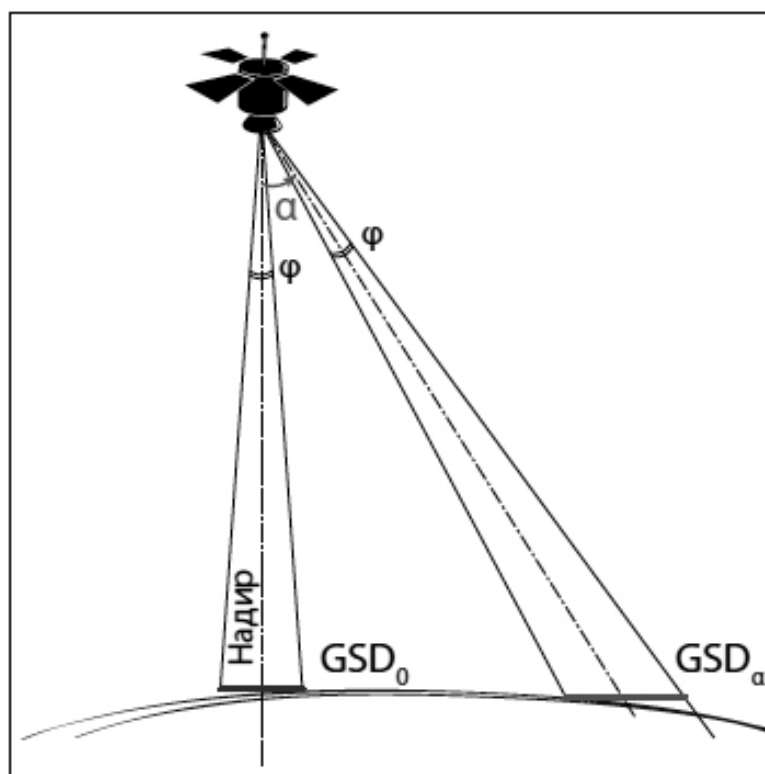


Рис. 7. Ухудшение пространственного разрешения при отклонении от надира

Заключение. Согласно статистике 93 % всех лесных пожаров возникает в 10-километровой пригородной зоне, а значит, по вине местного населения. Сильные пожары от удара молнии случаются крайне редко, примерно в 2 % случаев, поскольку грозы, как правило, сопровождаются дождем. Поэтому представляется крайне важным осуществлять постоянное наблюдение именно южных районов края, где проживает подавляющее количество населения.

Рассчитана дифракционно-ограниченная оптическая система, работающая в среднем ИК-диапазоне диаметром 1500 мм и фокусным расстоянием 2260 мм, которая имеет пространственное разрешение 200 м на пиксель с расстояния ГСО. Эта оптическая система может вести практически непрерывный мониторинг больших участков земной поверхности на предмет поиска пожаров малого размера, вплоть до 1–2 га, если ее разместить на геостационарной орбите. Чтобы система могла обнаруживать возгорания 0,1–0,2 га, необходимо запустить на ГСО два телескопа в режиме астрономического интерферометра.

Библиографические ссылки

1. Демин А. В., Моисеева И. М. Оценка коэффициента пропускания атмосферы на основе экспериментальных данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 5. 35–40 с.
2. Физика космоса / под ред. академика Р. А. Сюняева. М. : Советская энциклопедия, 1986. 783 с.
3. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы ДЗЗ. М. : Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
4. Глаголев Ю. А. Справочник по физическим параметрам атмосферы. Л. : Гидрометеиздат, 1970. 194 с.
5. ИТЦ «СканЭкс». Мониторинг лесных и торфяных пожаров [Электронный ресурс]. URL: www.scanex.ru/data/Applications_ScanEx_p43-47.pdf (дата обращения: 13.11.2014).
6. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. ДЗЗ из космоса. Цифровая обработка изображений. М. : Логос, 2001. 264 с.
7. Петров М. Н., Юронен Ю. П. Технология оценки ущерба от лесных пожаров // Фундаментальные исследования. 2007. № 2. 10–20 с.
8. Теребиж В. Ю. Современные оптические телескопы. М. : Физматлит, 2005. 80 с.
9. Максудов Д. Д. Астрономическая оптика. Л. : Наука, 1979. 395 с.
10. Михельсон Н. Н. Оптика астрономических телескопов и методы её расчета. М. : Физматлит, 1995. 383 с.
11. Зайков В. И., Скоморовский С. А. Лазерно-оптические системы в теплотехнических измерениях. Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре Рос. техн. ун-т, 1999. 85 с.
12. ООО «Флюорит». Кальций фтористый, CaF₂ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fluoride.su/index.html> (дата обращения: 13.11.2014).
13. Емельянов Э. В. Астрофизика ИК-диапазона. М. : Физматлит, 2009. 34 с.
14. Урмаев М. С. Орбитальные методы космической геодезии. М. : Недра, 1981. 254 с.
15. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М. : Техносфера, 2010. 560 с.

References

1. Demin A. V., Moiseev I. M. [Evaluation of transmittance of the atmosphere on the basis of experimental data]. *Izvestiya vyzov*, 2012, Vol. 55, No. 5, P. 35–40 (In Russ.).
2. *Fizika kosmosa*. [Physics of the Cosmos]. Ed. R. A. Sunyaeva. USSR, 1986, 783 p.
3. Garbuk S. V., Gershenson V. E. *Kosmicheskie sistemy DZZ* [Remote-sensing systems]. Moscow, Izd. A i B Publ., 1997, 296 p.
4. Glagolev Y. A. *Spravochnik po fizicheskim parametram atmosfery* [Handbook of physical parameters of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970, 194 p.
5. ITC SCANEX *Monitoring lesnyh i torfyanyh požarov* [Monitoring of forest and peat fires]. (In Russ.). Available at: www.scanex.ru/ru/data/Applications_ScanEx_p43-47.pdf (accessed 10.11.2014).
6. Kashkin V. B., Sukhinin A. I. *Dzz iz kosmosa. Tsi-frovaya obrabotka izobrazhenii* [Remote sensing from space. Digital image processing]. Moscow, Logos Publ., 2001, 264 p.
7. Petrov M. N., Yronen Y. P. [Technology assessment of damage from forest fires]. *Fyndamentalnye issledovaniya*, 2007, No. 2, P. 10–20 (In Russ.).
8. Terebizh V. Y. *Sovremennye opticheskie telescopy* [Modern optical telescopes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 80 p.
9. Maksutov D. D. *Astronomicheskaya optika* [Astronomical optics]. Leningrad, Nauka Publ., 1979, 395 p.
10. Michelson N. N. *Optika astronomicheskikh teleskopov i metody ee rascheta* [Optics for astronomical telescopes and methods of its calculation]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1995, 383 p.
11. Zaykov V. I., Skomorovsky S. A. *Lazerno-opticheskie sistemy v teplotekhnicheskikh izmereniyah* [Laser-optical system in thermal measurements]. Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-na-Amure ros. tehn. Univ. Publ., 1999, 85 p.
12. Komppania Fluorite [The Company Fluorite]. (In Russ.) Available at: <http://www.fluoride.su/index.html> (accessed 10.11.2014).
13. Emelyanov E. V. *Astrofizika IK diapazona* [Astrophysics IR range]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 34 p.
14. Urman M. S. *Orbitalnye metody kosmicheskoy geodezii* [Orbital methods of space geodesy]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 254 p.
15. Shovengerdt R. A. *Distantcionnoe zondirovanie. Metody i modely obrabotki izobrazheniy* [Remote sensing. Methods and models for image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2010, 560 p.

© Веселков С. А., Горбатюк Е. О.,
Кузакова Н. М., Заварзина А. В., 2015

**УМЕНЬШЕНИЕ МАССЫ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ
ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

В. В. Двирный, Н. В. Еременко*, Г. В. Двирный

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

*E-mail: erko@iss-reshetnev.ru

Масса кабельной продукции космических аппаратов является одним из самых важных параметров, учитываемых при разработке спутников. Необходимо обеспечить высокое соотношение массы полезной нагрузки относительно массы всего космического аппарата, поскольку доля кабельных линий в весовой сводке масс современных космических аппаратов составляет значимую часть; также кабели имеют значительную протяженность, в связи с этим масса кабельных линий приобретает высокую актуальность. Приводятся определение и оценка основных критериев, учитываемых при проектировании силовых шин питания, входящих в состав бортовой кабельной сети телекоммуникационных космических аппаратов. Определены основные вкладчики в бюджет масс на уровне космического аппарата, приведен анализ существующих в настоящий момент на мировом рынке конкурентоспособных изготовителей платформ космических аппаратов и сравнение массовых характеристик космических аппаратов, изготовленных на базе высокоэнерговооруженных платформ, на примере спутников на базе платформ E3000 и «Экспресс-2000». Описана необходимость учета важных обобщенных показателей, таких как стоимость и масса, при выборе изготовителя кабельной продукции. Уменьшение массы низкочастотной бортовой кабельной сети возможно за счет применения новых современных технологий, подтвержденных натурными испытаниями, широко применяемыми как отечественными, так и зарубежными изготовителями космических аппаратов. Проанализировано преимущество применения силовых шин, обеспечивающих надежное распределение постоянной энергии, которые являются жизненно важными элементами электропитания телекоммуникационных космических аппаратов. Обосновано использование современной технологии Bus Bar компании Axon, которая позволяет уменьшить массу силовой низкочастотной бортовой кабельной сети космического аппарата и добиться снижения массы изделия и удешевить его запуск.

Ключевые слова: силовые шины, кабельная сеть космического аппарата, уменьшение массы низкочастотной бортовой кабельной сети космического аппарата.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 658–663**REDUCTION OF SPACECRAFT HARNESS MASS**

V. V. Dvirnyi, N. V. Eremenko*, G. V. Dvirnyi

JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation

*E-mail: erko@iss-reshetnev.ru

Mass of cables implemented on-board a spacecraft is one of the drivers taken into account during spacecraft design phase. One of the requirements is to provide a high ratio between Payload and Spacecraft mass because the contribution of cable lines to spacecraft mass budget is significant, and cable lines have significant lengths, so mass of cable lines becomes a challenging issue. The article identifies and assesses major criteria considered during design of power lines belonging to telecommunication satellites harness. Major contributors to satellite mass budget has been identified, a description of major competitors among world level satellite platform manufactures is given, a comparison of masses of satellites manufactured on the basis of powerful Platforms, i. e. E3000 and Express-2000 is provided. The need to consider such generic criteria as mass and cost during selection of harness manufactures is described. Reduction of on-board harness mass is possible when new, state-of-the-art technology is used. The technology should have a flight proven heritage and shall be widely used by satellite manufacturers in Russia and worldwide. The advantage of implementation of power lines ensuring reliable power distribution which are vital elements of telecommunication satellite electric power subsystem has been reviewed. Implementation of state-of-the-art Axon' Bus Bar technology, allowing to reduce satellite harness mass and to achieve reduction of satellite mass resulting in decrease of launch cost is being justified.

Keywords: Bus Bars, on-board harness, reduction of spacecraft harness mass.

Введение. При проектировании космических аппаратов (КА) проводится анализ баланса массовых, электроэнергетических и ресурсных характеристик КА [1], учитываются разные параметры, одним из которых является отношение массы полезной нагрузки к общей массе КА. Чем лучше это соотношение, тем лучше могут быть выполнены задачи миссии. Обычно грузоподъемность ракеты-носителя определяет максимальную массу КА на орбите. Чем меньше весит платформа, тем больше полезного груза может быть доставлено на заданную орбиту [2]. В связи с высокой стоимостью доставки 1 кг коммерческого груза на геостационарную орбиту (на сегодня она составляет 25–30 тыс. долл. [3]) необходима оптимизация подсистем космических аппаратов, направленная на уменьшение их массы. Необходимо рассмотреть, какую долю в бюджете масс космических аппаратов составляет бортовая кабельная сеть (БКС), и проанализировать, за счет чего возможно обеспечить ее уменьшение на уровне космического аппарата.

Проектирование и изготовление бортовой кабельной сети космических аппаратов. В настоящее время проектирование беспилотных космических аппаратов немыслимо без бортовой кабельной сети. Подобно кровеносной системе человека, бортовая кабельная сеть несет на себе столь сложную функцию в космическом аппарате [4]. В настоящее время требования к современным спутникам значительно выросли. Соответственно, и низкочастотная бортовая кабельная сеть, как неотъемлемая часть КА, должна существенно измениться.

Производство бортовой кабельной продукции на предприятиях ракетно-космической отрасли в настоящее время осуществляется на основе технологических процессов, материалов, комплектующих изделий, инструментов, технологического и испытательного оборудования, которые разработаны и внедрены 20–25 лет назад для космических аппаратов с ресурсом 3–5 лет. Применяемые в ракетно-космической отрасли технологические процессы изготовления и испытаний бортовых кабелей не позволяют улучшить технические характеристики без увеличения массы, существенно снизить трудоемкость и сократить технологический цикл от разработки до выпуска готовой продукции до 4–6 месяцев, как в западных космических фирмах. В ракетно-космической отрасли существует острая необходимость модернизации производства кабельной продукции за счет разработки и внедрения принципиально новой технологии проектирования, изготовления и испытаний, не уступающей технологиям, применяемым западными космическими фирмами [5].

Массогабаритные показатели особенно важны при создании летательных аппаратов [6]. Доля кабельных линий в весовой сводке масс современных высокоэнерговооруженных КА, например спутников связи типа «Экспресс», за счет увеличения количества транспондеров, например до 84, а в пересчете на эквивалентные с полосой пропускания 36 МГц – до 153, на самом мощном российском спутнике составляет

свыше ста килограммов. БКС представляет собой сложную систему, на большом КА для БКС может потребоваться более 50 000 соединений, реализованных на 1 000 соединителях, соединенных 20 км проводов [7]. Кабели имеют значительную протяженность, в связи с этим масса кабельных линий приобретает высокую актуальность.

Бортовую кабельную сеть необходимо оценивать на основе уровня конкурентоспособности платформы. Уровень конкурентоспособности платформ геостационарных спутников связи определяется рядом технических и эксплуатационных характеристик, часть из которых не зависит от размерности (класса) платформы и является общим показателем для всех платформ геостационарных спутников связи, по которому можно сравнивать эффективность всех платформ.

Основные производители платформ для спутников связи на мировом рынке. В настоящее время мировой уровень платформ для спутников связи определяется такими ведущими мировыми производителями, как следующие американские фирмы:

- Boeing Satellite Systems (BSS) (спутники на базе платформ семейства BSS 702 [8]);
- Lockheed Martin Commercial Space Systems (LMCSS) (спутники на базе платформ семейства A 2100 [9]);
- Space Systems/Loral (SSL) (с 2012 г. является дочерней компанией MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA)) (спутники на базе платформ семейства LS-1300 [10]);
- Orbital Sciences Corporation (Orbital) (спутники на базе платформ семейства Star Bus),
- а также западноевропейские фирмы:
- Thales Alenia Space (спутники на базе платформ семейства Spacebus [11]);
- Airbus Defence & Space (ранее EADS Astrium, до реорганизации и объединения в 2014 г. с Airbus Military и Cassidian) (спутники на базе платформ семейства Eurostar [12]);
- Thales Alenia Space совместно с Airbus Defence & Space (перспективные спутники на базе совместной платформы Alphabus [13]).

В России единственным производителем платформ геостационарных спутников связи, относительно широко представленным как на внутреннем, так и на внешнем рынке, является АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». АО «ИСС» разрабатывает платформы среднего класса семейства «Экспресс-1000» (с мощностью для полезной нагрузки до 8 кВт) и платформы тяжелого класса семейства «Экспресс-2000» (с мощностью для полезной нагрузки до 16 кВт) [14].

Сравнение массовых характеристик двух платформ тяжелого класса. Сравнение массовых характеристик платформ тяжелого класса (мощность для полезной нагрузки более 8 кВт) – платформы Eurostar 3000 (E 3000) фирмы Airbus Defence & Space и платформы «Экспресс-2000» разработки АО «ИСС» – приведено в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Массовые характеристики платформ Е 3000 и «Экспресс-2000» и спутников на их базе

Массовые характеристики	Платформа Eurostar 3000 фирмы Airbus Defence & Space		Платформа «Экспресс-2000» АО «ИСС»	
	Масса, кг	% от сухой массы	Масса, кг	% от сухой массы
Масса бортового комплекса управления (БКУ) (с командно-измерительной системой (КИС))	80,1	2,8	108,1	3,62
Масса системы ориентации и стабилизации (СОС) (без поворотного устройства солнечной батареи (УПБС))	41,7	1,46	59,6	2,0
Масса системы электропитания (СЭП) (включая механические устройства солнечной батареи (МУ БС) и УПБС)	711,3	24,87	632	21,17
Масса системы коррекции (СК)	238	8,32	185,7	6,22
Масса системы терморегулирования (СТР)	188,4	6,59	219,5	7,35
Масса конструкции (включая полезную нагрузку (ПН))	604,7	21,15	547,7	18,35
Масса бортовой кабельной сети	48,9	1,71	154	5,16
Сухая масса платформы	1913,1	66,9	1907,4	63,87
Масса полезной нагрузки	946,6	33,1	1079	36,13
Сухая масса спутника	2859,7	100	2986,4	100
Масса топлива для миссии на геостационарной орбите (ГСО)	975	34,09	339,5	11,37
Масса КА на момент начала работы на ГСО	3834,7	134,09	3325,9	111,37
Масса топлива для выведения на ГСО	1850	64,69	0	0
Стартовая масса КА (без адаптера и устройства отделения (УО))	5684,7	198,78	3325,9	111,37

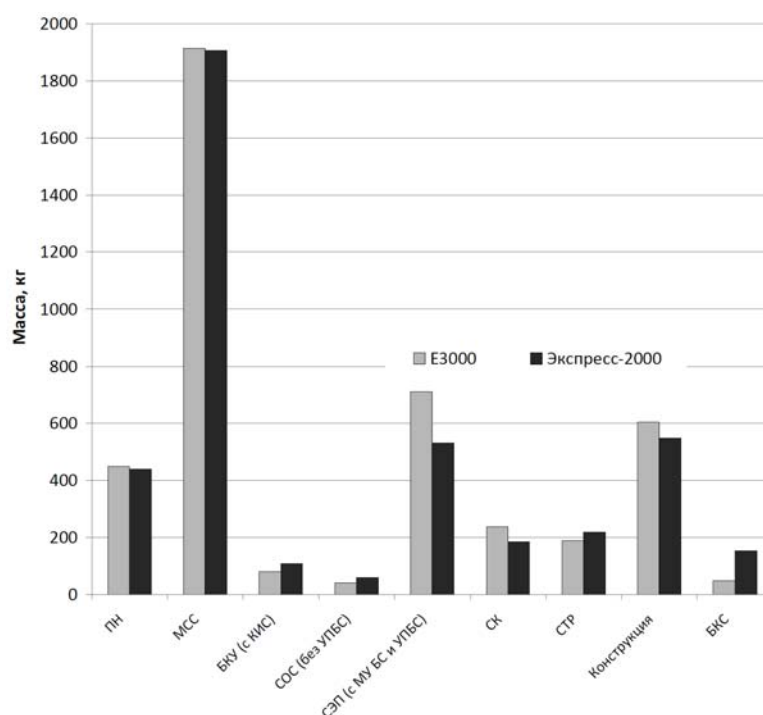


Рис. 1. Массовые характеристики платформ и их бортовых подсистем [15]

Сравнение массовых характеристик БКС рассматриваемых платформ. Результаты сравнения массовых характеристик платформ «Экспресс-2000» и Е 3000, а также их подсистем позволяют сделать следующий вывод по БКС. Масса БКС платформы «Экспресс-2000» существенно превышает массу БКС платформы Е 3000 как в абсолютном выражении, так и в процентах от сухой массы спутника (154 кг или 5,16 % по сравнению с 48,9 кг или 1,71 %), что свидетельствует о том, что примененные технологии,

а также материалы и комплектующие не соответствуют современному уровню требований. Для повышения конкурентоспособности должны быть разработаны и квалифицированы новые конструктивные и технологические решения по конструкции БКС [15].

Кооперация в спутникостроении. Технология Bus Bar для систем электропитания КА, ее преимущества. В спутникостроении развита кооперация. При создании спутников, как для государственных, так и для коммерческих заказчиков, широко

используется и российская, и зарубежная кооперация [16]. На кабельной продукции специализируются многие фирмы. ОАО «ИСС» сотрудничает с компанией Axon' Cable SAS (Франция), которая производит и поставляет силовые шины питания, изготовленные по современной технологии Bus Bar для системы электропитания спутников.

Шины Bus Bar (рис. 2) предназначены для того, чтобы распределять электропитание между различными устройствами и приборами на борту космического аппарата. Применение алюминиевых силовых шин в составе спутника позволит значительно сократить массу электрической системы, а значит, и общий вес космического аппарата. Еще одним важным преимуществом новых элементов питания является то, что они выполняют функцию теплоотвода. За счет прямоугольного профиля и ровной поверхности шины обладают хорошим теплообменом, а значит, не позволяют перегреваться составным частям спутника, что крайне важно в условиях космоса. Силовые шины Axon' будут применяться на перспективных спутниках, создаваемых АО «ИСС» в интересах российских и зарубежных заказчиков. АО «ИСС» работает над вопросом создания производства кабельной продукции на основе технологий Axon', что позволит добиться снижения массы изделия и удешевить его запуск. Сейчас общий вес сетей на спутниках АО «ИСС» составляет 6–8 % от массы космического аппарата, на западных спутниках – 4 %. Технологии Axon' позволяют производить кабельные жгуты, толщина жил которых составляет около двух микрон [17].

Основные преимущества шин:

– меньшая масса по сравнению с решениями с применением меди;

– улучшенное тепловыделение по сравнению с силовым кабельным жгутом круглой формы;

– возможность значительного сокращения падения напряжения линии распределения питания.

Множество КА на базе платформы Eurostar 3000, имеющих летную 10-летнюю квалификацию, оснащено шинами производства компании Axon' (например, КА ASTRA, ARABSAT, INTELSAT, SKYNET).

Сравнение силовых шин Bus Bar и традиционно используемых кабелей. Показатель для сравнения параметров кабельной продукции. Важно сравнить технические характеристики кабелей и выбрать наиболее подходящие.

Силовые шины Bus Bar компании Axon' квалифицированы для космического применения, и по параметрам и характеристикам (рабочему напряжению в цепях, максимальному току в цепях, допустимому падению напряжения в цепях, рабочей температуре, потере массы неметаллических материалов, содержанию летучих конденсируемых веществ в неметаллических материалах, радиационной стойкости) соответствуют всем установленным требованиям. Применение силовых шин Bus Bar вместо традиционно используемых кабелей с медными жилами позволяет уменьшить массу силовой низкочастотной бортовой кабельной сети (НЧ БКС) до 45 %.

Нами предложен обобщенный показатель для сравнения параметров кабельной продукции:

$$K = \frac{I \cdot l \cdot \tau}{m \cdot c},$$

где I – максимально допустимый ток; l – длина; τ – гарантийный срок службы, квалифицированный в составе КА; m – масса, кг; c – стоимость, руб.



Рис. 2. Внешний вид шины Bus Bar [18]

Таблица 2

Таблица параметров для сравнения кабельной продукции и обобщенный показатель

Тип кабеля	I	l	τ	m	c	K
Кабель АО «ИСС»	I	l	15 лет	m	c	K
Кабель Axon'	I	l	15 лет	$0,55m$	$2c$	$0,9K$

Как видно из табл. 2, кабели отличаются только по массе и стоимости, что позволяет рассчитать параметр K по сокращенной формуле

$$K = \frac{p}{m \cdot c},$$

где p – произведение I, l, τ .

Получаем, что для кабелей производства АО «ИСС» показатель равен K , а для силовых шин Bus Bar показатель равен $0,9 K$.

Заключение. Несмотря на то, что стоимость кабелей производства АО «ИСС» в два раза ниже стоимости силовых кабелей зарубежного производителя, решающим критерием при принятии решения в пользу силовых шин Bus Bar является их масса и возможность уменьшения массы силовой НЧ БКС до 45 %.

Для подтверждения соответствия силовых шин требованиям, заданным на их уровне, в части механических воздействий, действующих на космический аппарат во время наземной отработки, транспортировки, на этапе выведения и при выполнении маневров при эксплуатации на орбите, изготовители силовых шин проводят испытания на инженерно-квалификационных моделях. Также летные модели силовых шин подвергаются испытаниям на внешние воздействия в составе КА на приемочных уровнях.

Мы предлагаем провести испытания силовых шин с имитацией механических воздействий, действующих на КА на протяжении всего жизненного цикла КА, для определения надежности новой технологии силовых шин и подтверждения их соответствия требованиям спецификации.

Библиографические ссылки

1. Космические аппараты / под общ. ред. К. П. Феоктистова. М. : Воениздат, 1983. 319 с. : ил.
2. Полезная нагрузка космического аппарата [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Полезная_нагрузка_космического_аппарата (дата обращения: 12.11.2014).
3. Пацкова Е. Г. Технологические особенности кабельной сети высокоэнерговооруженного космического аппарата : дис. ... магист. / СФУ. Красноярск, 2012. 109 с.
4. Сергеев А. К. Проектирование бортовой кабельной сети космических аппаратов с использованием средств 3D-моделирования [Электронный ресурс]. URL: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2012/2/11.htm> (дата обращения: 12.11.2014).
5. Сунцов С. Новые технологии создания бортовой кабельной сети [Электронный ресурс] // Информационные спутниковые системы : электрон. журн. / ОАО «ИСС». 2010. № 10. Систем. требования: Adobe Acrobat. URL: <http://www.iss-reshetnev.ru/images/File/magazin/2010/m10-screen.pdf> (дата обращения: 12.11.2014).
6. Детали механизмов авиационной и космической техники : учеб. пособие / Ю. М. Климов [и др.] ; под ред. Ю. М. Климова и Е. А. Самойлова. М. : Изд-во МАИ, 1996. 344 с. : ил.
7. Marc Malagoli, Laurence Cosquéric Space Harness Design Optimization Opportunities on ECSS derating rules [Электронный ресурс] // ESCIES. Систем. требования: Adobe Acrobat. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=https%3A%2F%2Fescies.org%2Fdownload%2FwebDocumentFile%3Fid%3D60980&ei=ZyGFVOn_DofxUoOygeP&usq=AFQjCNHAGkkYc9M_9v2qLoubvBaElyCUQ&bvm=bv.80642063,d.d24&cad=rjt (дата обращения: 12.11.2014).
8. Боинг 702 [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%B8%D0%BD%D0%B3_702 (дата обращения: 12.11.2014).
9. A2100 [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/A2100> (дата обращения: 12.11.2014).
10. Платформа 1300-й серии [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E0%F2%F4%EE%F0%EC%E0_1300-%E9_%F1%E5%F0%E8%E8 (дата обращения: 12.11.2014).
11. Спейсбас [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D1%EF%E5%E9%F1%E1%E0%F1> (дата обращения: 12.11.2014).
12. Eurostar (космическая платформа) [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Eurostar_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Eurostar_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0)) (дата обращения: 12.11.2014).
13. Alphabus Wikipedia [Электронный ресурс] // WIKIPEDIA.ORG : the free encyclopedia. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alphabus> (дата обращения: 12.11.2014).
14. Экспресс (спутниковая платформа) [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : свободная общедоступная мультязычная универсальная интернет-энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%DD%EA%F1%EF%F0%E5%F1%F1_\(%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA%EE%E2%E0%FF_%EF%EB%E0%F2%F4%EE%F0%EC%E0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%DD%EA%F1%EF%F0%E5%F1%F1_(%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA%EE%E2%E0%FF_%EF%EB%E0%F2%F4%EE%F0%EC%E0)) (дата обращения: 12.11.2014).
15. Халиманович В. И. Проект стратегической программы исследований технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» на 2012–2020 годы [Электронный ресурс] // HSE.RU : Высшая школа экономики, Национальный исследовательский университет. Железногорск, 2012. Систем. требования: Adobe Acrobat. URL: http://www.hse.ru/data/2012/07/13/1254699364/report_tp-niss-2011.pdf (дата обращения: 12.11.2014).

16. Ситник Л. Интервью с Н. А. Тестоедовым «Купить коммерческий спутник можно, но вы никогда не купите спутник для ГЛОНАСС» [Электронный ресурс] // ВТБ. URL: <http://www.vtb.ru/group/press/news/interview/298692/> (дата обращения: 12.11.2014).

17. Мармышев А. ИСС заключила контракт на поставку шин питания для спутников [Электронный ресурс] // RIA.RU : информационное агентство РИА Новости. URL: <http://ria.ru/science/20120914/749917212.html> (дата обращения: 12.11.2014).

18. Expert in cables interconnect solutions : брошюра Axon' Cable and Interconnect [Электронный ресурс] / AXON'. Октябрь 2013/В. Систем. требования: Adobe Acrobat. URL: <http://www.axon-cable.com/publications/docAXON-UK.pdf> (дата обращения: 12.11.2014).

References

1. Feoktistov K. P. *Kosmicheskie apparaty*. [Spacecrafts]. Moscow, Voenizdat Publ., 1983, 319 p.

2. *Poleznaya nagruzka kosmicheskogo apparata*. [Spacecraft payload]. (In Russ.) Available at https://ru.wikipedia.org/wiki/Poleznaya_nagruzka_kosmicheskogo_apparata (accessed 12.11.2014).

3. Patskova E. G. *Tekhnologicheskie osobennosti kabel'noi seti vysokoenergovoорuzhennogo kosmicheskogo apparata*. [Technical features of harness for high performance spacecraft]. Master's thesis work, SFU, Krasnoyarsk, 2012, 109 p. (In Russ.).

4. Sergeev A. K. *Proektirovanie bortovoi kabel'noi seti kosmicheskikh apparatov s ispol'zovaniem sredstv 3D modelirovaniya*. [Spacecraft harness design with 3D modeling tools] (In Russ.). Available at <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2012/2/11.htm> (accessed 12.11.2014).

5. Suntsov S. [New technology in on-board harness] *Informatsionnye sputnikovye sistemy*, 2010, No. 10 (in Russ.). Available at: <http://www.iss-reshetnev.ru/images/File/magazin/2010/m10-screen.pdf> (accessed 12.11.2014).

6. Klimov U. M., Samoilov E. A., Zezin N. L. *Detali mekhanizmov aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki*. [Aircraft and spacecraft mechanisms parts]. Moscow, MAI Publ., 1996. 344 p.

7. Marc Malagoli, Laurence Cosquéric Space Harness Design Optimization Opportunities on ECSS derating rules. Available at: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBwQFjAA&url=https%3A%2F%2Fscies.org%2Fdownload%2FwebDocumentFile%3Fid%3D60980&ei=ZyGFVOn_DofxUoOygegP&usq=AFQjCNHAGkkYc9M_9v2qLoubvBaEIyCUuQ&bvm=bv.80642063,d.d24&cad=rjt (accessed 12.11.2014).

8. *Boeing 702*. [Boeing 702]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%B8%D0%BD%D0%B3_702 (accessed 12.11.2014).

9. *A2100*. [A2100]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/A2100> (accessed 12.11.2014).

10. *Platforma 1300-i serii*. [1300 series platform]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%EB%E0%F2%F4%EE%F0%EC%E0_1300-%E9_%F1%E5%F0%E8%E8 (accessed 12.11.2014).

11. *Speisbas*. [Spacebus]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D1%EF%E5%E9%F1%E1%E0%F1> (accessed 12.11.2014).

12. *Eurostar (kosmicheskaya platforma)*. [Eurostar (space platform)]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Eurostar_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Eurostar_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0)) (accessed 12.11.2014).

13. Alphabus. Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Alphabus> (accessed 12.11.2014).

14. *Ekspress (sputnikovaya platforma)*. [Express (satellite platform)]. Wikipedia, the free encyclopedia (In Russ.). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%DD%EA%F1%EF%F0%E5%F1%F1_%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA%EE%E2%E0%FF_%EF%EB%E0%F2%F4%EE%F0%EC%E0 (accessed 12.11.2014).

15. Khalimanovich V. I. *Proekt strategicheskoi programmy issledovaniy tekhnologicheskoi platformy «Natsional'naya informatsionnaya sputnikovaya sistema» na 2012 – 2020 gody*. [Draft strategy investigation program of technology platform “National information satellite system” for 2012 – 2020], Zheleznogorsk, 2012 (In Russ.). Available at: http://www.hse.ru/data/2012/07/13/1254699364/report_tp-niss-2011.pdf (accessed 12.11.2014).

16. Sitnik Leonid. Interv'yu s N.A. Testoeodovym *Kupit' kommercheskii sputnik mozjno, no vy nikogda ne kupite sputnik dlya GLONASS* [Interview with N. A. Testoyedov. It is possible to buy a commercial satellite, but one can never buy a satellite for GLONASS]. VTB (In Russ.). Available at: <http://www.vtb.ru/group/press/news/interview/298692/> (accessed 12.11.2014).

17. Marmyshev A. *ISS zaklyuchila kontrakt na postavku shin pitaniya dlya sputnikov* [ISS and Axon' signed a contract for delivery of satellite bus bars]. RIA Novosti (In Russ.). Available at: <http://ria.ru/science/20120914/749917212.html> (accessed 12.11.2014).

18. Brochure of Axon' Cable and Interconnect. *Expert in cables interconnect solutions*. @AXON'. October 2013/ B. Available at: <http://www.axon-cable.com/publications/docAXON-UK.pdf> (accessed 12.11.2014).

**МЕТОД СИНТЕЗА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ГИБРИДНО-ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ**В. И. Серенков^{1*}, И. Н. Карцан¹, Д. Д. Дмитриев²¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31² Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

*E-mail: servlad@list.ru

Основной недостаток спутниковых радионавигационных систем – их низкая помехоустойчивость. Это обусловлено тем, что высота орбиты навигационных спутников составляет 20 000 км над уровнем Земли, и навигационный сигнал, поступающий со спутников, имеет крайне низкий уровень. Применяя методы оптимальной обработки сигналов, тем не менее удастся проводить достаточно точные навигационные измерения. Однако в случае сложной электромагнитной обстановки навигационные сигналы легко подавляются помехами. Источниками помех могут быть системы связи, радиолокации и др. Особенно проблема подавления навигационных сигналов проявляется в районах аэропортов. В последние годы проблеме помехоустойчивости радионавигационной аппаратуры уделяется большое внимание.

Предложен метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны, обеспечивающего формирование контурной зоны обслуживания и провалов диаграммы направленности (ДН) в направлении не менее чем на три источника помехового сигнала. Разработанный метод обеспечивает формирование провалов в диаграмме направленности до минус 45–50 дБ при снижении уровня полезного сигнала не более 1 дБ при угловом разноразности сигнала и помехи не менее чем на 0,15 от ширины ДН в главном лепестке ДН. При положении помехи в направлении боковых лепестков снижение полезного сигнала не происходит. Кроме того, разработанный метод обеспечивает ускоренную адаптацию к помеховой обстановке, заключающуюся в выборе из предварительно рассчитанных вариантов амплитудного распределения антенной решетки наиболее близкого к оптимальному в основном лепестке диаграммы направленности. Время адаптации уменьшается на 25 % с учетом быстрой работы современных фазовращателей, скорость работы которых сопоставима с временем работы адаптивных алгоритмов. Для ускорения расчета амплитудно-фазового распределения целевая функция была ограничена набором точек, задаваемых программно, что позволяет уменьшить время синтеза в 5 раз по сравнению с классическим градиентным методом.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, алгоритм адаптации, многолучевая антенна, гибридно-зеркальная антенна.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 664–669**METHOD FOR THE SYNTHESIS OF AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION
OF HYBRID-MIRROR ANTENNA**V. I. Serenkov^{1*}, I. N. Kartsan¹, D. D. Dmitriev²¹ Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation² Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

*E-mail: servlad@list.ru

The main disadvantage of satellite radio navigation systems is their low noise immunity. This is because the orbit of navigation satellites is 20 000 km above ground level, and the navigation signal from satellites, is extremely low. Applying the optimal methods of signal processing, however, manages to hold reasonably accurate navigational dimension. However, in the case of complex electromagnetic environment navigation signals are easily suppressed. Interference sources can be communication systems, radar, etc. Especially the problem of navigation signal suppression manifests around airports. In recent years, the problem of noise immunity of radio equipment has received much attention.

Method synthesis of amplitude-phase distribution of hybrid-mirror antenna, providing formation of contour service area and failures of directional pattern towards at least three sources of an interfering signal is suggested. The method

ensures the formation of failures in the chart orientation to minus 45–50 dB at signal level not more than 1 dB for corner signal timing and interference not less than 0.15 of the width of the NAM in the main petal days. Under the situation of interference in the direction of reducing side lobe, useful signal does not occur. In addition, the developed method provides an accelerated adaptation to jamming conditions of a choice of pre-calculated variants of amplitude distribution of antenna array of the most close to the optimal, mainly petal pattern. Adaptation time is reduced by 25 %, taking into account the performance of modern shifters, the speed of which is comparable with the time of work of Adaptive algorithms. To speed up calculation of amplitude-phase distribution of the target function was limited to a set of points specified programmatically that allows the 5 times reduction of time of synthesis in comparison with the classic gradient method.

Keywords: Adaptive antenna array, adaptation algorithm, multi-beam antenna, hybrid-reflector antenna.

Введение. В настоящее время определены основные требования к перспективным системам спутниковой связи: существенное расширение пропускной способности каналов связи, освоение новых частотных диапазонов, возможность гибкого управления трафиком в зависимости от нагрузки на канал связи, подразумевающая формирование многолучевых диаграмм направленности (ДН) в пределах зоны ответственности, высокая помехоустойчивость при воздействии как преднамеренных, так и промышленных помех.

Для защиты от помех могут быть использованы два основных направления:

– помехоустойчивое кодирование и модуляция, часто рассматриваемые как единое целое – кодовая модуляция, режимы свертки распределенных спектров псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) или фазовая модуляция широкополосного сигнала (ФМ ШПС), или сигнальная помехозащита;

– пространственная режекция активных помех с помощью адаптивных процессоров приемных бортовых многолучевых антенн (МЛА), формирующих нули ДН в направлении на помеху.

В настоящее время реализованная степень сигнальной защиты от помех составляет 12–20 дБ, в зависимости от требований по соотношению скорости передачи информации и уровня помехозащиты.

Пространственная режекция помех с помощью адаптивной антенны на борту космического аппарата (КА) улучшает этот показатель системы связи на 30–45 дБ к достигнутому уровню сигнальной помехозащиты.

Построение адаптивной антенны на борту КА на основе гибридно-зеркальной антенны (ГЗА) имеет преимущества перед фазированными антенными решетками (ФАР) по стоимости и массе, что связано с высокими требованиями по коэффициенту усиления антенной системы (более 35–40 дБ).

Основным элементом многолучевой ГЗА является облучатель, представляющий собой адаптивную антенную решетку (ААР). В ААР пространственной фильтрации одновременно в косвенной форме производится оценка приходящих сигналов. При этом вся ААР рассматривается как единый пространственный фильтр [1–10].

В данной статье предлагается метод синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) гибридно-зеркальной антенны, обеспечивающего формирование контурной зоны обслуживания и провалов диаграммы направленности в направлении не менее чем на три источника помехового сигнала.

Физическая суть адаптации. Параметры ААР достигаются необходимым выбором весовых коэффициентов (ВК) $\mathbf{W}^T(t)$, включенных между антенными элементами, $i = 1, \dots, N$, и общим сумматором. ВК обеспечивают соответствующее формирование суммарной ДН (амплитудной, фазовой и поляризационной), представляющей собой отклик на сигнал заданной поляризации. В то же время их предназначение можно интерпретировать как задачу формирования таких соотношений между принимаемым в каждом из $i = 1, \dots$, антенных элементов полезным сигналом $s(t)$, суммой J узкополосных анизотропных помех $\sum_{j=1}^J n_j(t)$ и шумом $v(t)$ [11]:

$$x_i(t) = s(t) + \sum_{j=1}^J n_{ij}(t) + v(t); \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

которые после сложения на общем сумматоре позволяют обеспечить желаемое свойство суммы (1) с помощью набора весовых коэффициентов $\mathbf{W}^T(t)$, рассматриваемых как компоненты вектора:

$$\mathbf{W}^T(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_N(t)]. \quad (2)$$

В общем случае вектор $\mathbf{W}^T(t)$ должен обладать возможностью изменения как амплитуды, так и фазы принимаемых сигналов, т. е. быть комплексным. При этом скорость его изменения должна быть согласована со скоростью изменения сигнально-помеховой ситуации, а диапазон этих изменений согласован с динамическим диапазоном изменений уровней сигналов и фазовых соотношений в различных элементах ААР.

На выходе общего сумматора ААР взвешена сумма сигналов в каждом канале:

$$y(t) = (\mathbf{W}^T(t), \mathbf{X}^*(t)) = w_1 \cdot x_1(t) + w_2(t) \cdot x_2(t) + \dots + w_N \cdot x_N(t). \quad (3)$$

При этом суммарная ДН как таковая может вообще не рассматриваться, хотя как промежуточная характеристика она, безусловно, представляет интерес. Так, ДН ААР может быть получена с помощью скалярного произведения $\mathbf{W}^T(t)$ на вектор $\mathbf{A}^T(\theta)$:

$$F(t) = \mathbf{W}^T(t), \mathbf{A}^{*T}(\theta). \quad (4)$$

В настоящее время известны решения [12; 13], различающиеся как выбранными критериями эффективности, так и предполагаемыми ограничениями.

ВК, необходимые для адаптивной пространственной обработки, могут быть сформированы по определённым алгоритмам [14; 15] с помощью процессора или аналоговых устройств. Выбор алгоритма определяется количеством сведений о принимаемом сигнале. Если известно направление на источник сигнала, то необходимо так вычислять ВК, чтобы обеспечить на выходе максимум отношения «сигнал–помеха» (алгоритм максимума «сигнал/шум»). Если известна структура сигнала, но неизвестно направление на абонента, используется алгоритм минимальной среднеквадратической ошибки (МСКО), обеспечивающий минимальную среднеквадратическую ошибку между ожидаемым и принимаемым сигналом. Если неизвестна ни структура сигнала, ни направление на корреспондента, ВК устанавливаются таким образом, чтобы уровень помех на входе был минимальным.

Наиболее часто применяемыми критериями эффективности [6] являются максимум отношения полезного сигнала к сумме помех на выходе системы адаптации; минимум среднего квадрата отклонения принятого сигнала от заданного эталонного $y_s(t)$; минимум мощности помех на выходе; максимум правдоподобия и др.

Функция $J(\mathbf{W})$, описывающая изменение показателя эффективности в зависимости от значений ВК, называется целевой. Целевая функция зависит от входных и выходных сигналов системы адаптации и от сигналов управления, т. е. $J = J(\mathbf{X}, y, \mathbf{W}, U_y)$.

Рассмотрим целевую функцию $J(\mathbf{W})$, используемую для решения задач оценивания (классической фильтрации). В этом случае цель адаптации состоит в обработке входных и выходных сигналов ААР таким образом, чтобы отфильтровать (подавить) помехи. Поэтому в целевую функцию включаются входные сигналы $\mathbf{X}^*(t)$, выходной сигнал $y(t)$ и ВК $\mathbf{W}^T(t)$, т. е. $J = J(\mathbf{X}, y, \mathbf{W})$. Структурная схема ААР, которая основана на реализации данного типа целевых функций, показана на рис. 1.

Выходной сигнал системы адаптации можно представить в следующем виде:

$$y(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t), \quad (5)$$

где вектор входного сигнала представляет собой сумму сигнала $\mathbf{s}(t)$ и шума $\mathbf{n}(t)$, т. е.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (6)$$

Поэтому сигнальную и шумовую составляющие выходного сигнала антенной решетки можно записать как

$$y_a(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{s}(t) = \mathbf{s}^T \mathbf{w}(t), \quad (7)$$

$$y_n(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{n}(t) = \mathbf{n}^T \mathbf{w}(t), \quad (8)$$

где

$$\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \dots \\ s_N(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{n}(t) = \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \dots \\ n_N(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Мощность выходного сигнала

$$E\{|y_s(t)|^2\} = \overline{|\mathbf{w}^T \mathbf{s}|^2}. \quad (10)$$

Мощность выходного шума

$$E\{|y_n(t)|^2\} = \overline{|\mathbf{w}^T \mathbf{n}|^2}. \quad (11)$$

Поэтому выходное отношение «сигнал/шум» (ОСШ) будет определяться выражением

$$\left(\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{n}}\right) = \frac{\overline{|\mathbf{w}^T \mathbf{s}|^2}}{\overline{|\mathbf{w}^T \mathbf{n}|^2}} = \frac{\mathbf{w}^T \overline{\mathbf{s} \mathbf{s}^T} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \overline{\mathbf{n} \mathbf{n}^T} \mathbf{w}} = \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{R}_{ss} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}}. \quad (12)$$

Выражение (12) можно представить и в другом виде:

$$\left(\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{n}}\right) = \frac{\mathbf{z}^T \mathbf{R}_{nn}^{-1/2} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{R}_{nn}^{-1/2} \mathbf{z}}{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}, \quad (13)$$

где

$$\mathbf{z} = \mathbf{R}_{nn}^{1/2} \mathbf{w}. \quad (14)$$

Числитель правой части (13) представляет собой квадратичную форму и принимает значения между минимальным и максимальным собственными значениями симметричной матрицы $\mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{R}_{ss}$. Оптимизация (13) с помощью соответствующего выбора весового вектора $\mathbf{w}$ сводится, таким образом, к задаче нахождения собственного вектора, причем $(\mathbf{s}/\mathbf{n})$ должно удовлетворять соотношению

$$\mathbf{R}_{ss} \mathbf{w} = \left(\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{n}}\right) \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}, \quad (15)$$

в котором $(\mathbf{s}/\mathbf{n})$ теперь представляет собственное значение матрицы $\mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{R}_{ss}$. Максимальное собственное значение, удовлетворяющее (15), обозначается как $(\mathbf{s}/\mathbf{n})_{\text{опт}}$. Собственному значению $(\mathbf{s}/\mathbf{n})_{\text{опт}}$ соответствует собственный вектор $\mathbf{w}_{\text{опт}}$, являющийся оптимальным весовым вектором для антенной решетки. Таким образом,

$$\mathbf{R}_{ss} \mathbf{w}_{i \text{ дн}} = \left(\frac{\mathbf{s}}{\mathbf{n}}\right)_{i \text{ дн}} \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}. \quad (16)$$

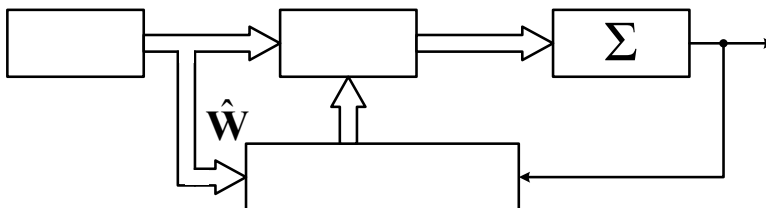


Рис. 1. Структурная схема реализации целевой функции подавления помех

Подстановка (12) при $(\mathbf{s}/\mathbf{n}) = (\mathbf{s}/\mathbf{n})_{\text{опт}}$ в (16) дает следующее выражение:

$$\mathbf{R}_{ss} \mathbf{w}_{i \text{ дн}} = \frac{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{R}_{ss} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}}{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}} \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}. \quad (17)$$

Подставляя $\mathbf{R}_{ss} [\mathbf{s} \mathbf{s}^T]$ и учитывая, что $\mathbf{s}^T \mathbf{w}_{\text{опт}}$ является скалярной величиной, входящей в обе части выражения (17), которую можно сократить, получаем

$$\mathbf{s} = \frac{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{s}}{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}} \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}. \quad (18)$$

Отношение $\frac{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{s}}{\mathbf{w}_{i \text{ дн}}^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_{i \text{ дн}}}$ представляет собой просто комплексное число, которое обозначим через c , т. е.

$$\mathbf{w}_{i \text{ дн}} = \left(\frac{1}{c} \right) \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{s}. \quad (19)$$

Максимальное значение $(\mathbf{s}/\mathbf{n})_{\text{опт}}$ легко найти с помощью преобразования системы координат. Положительно определенная эрмитова матрица $\mathbf{R}_{nn}$ с помощью невырожденного преобразования может быть приведена к диагональному виду. Это преобразование может быть выбрано так, чтобы шумовые составляющие на выходах всех каналов были некоррелированными и имели одинаковую мощность. Обозначим матрицу такого преобразования через $\mathbf{A}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{s}' &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}, \\ \mathbf{n}' &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\mathbf{s}'$, $\mathbf{n}'$ – преобразованные величины.

Тогда составляющие сигнала и шума на выходе антенной решетки будут соответственно определяться выражениями

$$\begin{aligned} y_s &= \mathbf{w}^T \mathbf{s}' = \mathbf{w}^T \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}, \\ y_n &= \mathbf{w}^T \mathbf{n}' = \mathbf{w}^T \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}. \end{aligned} \quad (21)$$

Структурная схема антенной решетки с линейным преобразованием, реализующей критерий отношения «сигнал/шум», приведена на рис. 2.

Максимальное ОСШ будет иметь следующий вид:

$$\hat{I} \check{N} \check{R}_{\text{max}} = \|\mathbf{s}'\|^2. \quad (22)$$

Подставляя (17) в (18), получаем:

$$\hat{I} \check{N} \check{R}_{i \text{ дн}} = \mathbf{s}'^T \mathbf{R}_{nn}^{-1} \mathbf{s}'. \quad (23)$$

Синтез алгоритмов вычисления ВК может быть обобщен. Это обобщение может быть распространено и на нелинейные задачи. В этом случае должно быть учтено наличие нелинейности амплитудной и фазовой характеристик в N каналах приема, ограничение динамического диапазона этих каналов и т. п. Нелинейным может оказаться и уравнение состояния.

Метод синтеза амплитудно-фазового распределения гибридно-зеркальной антенны. Для решения поставленных вопросов проведем синтез АФР в облучающей решетке. Рассмотрим принцип работы данной системы на примере ГЗА с рефлектором и 19-элементной облучающей решетки.

В качестве критерия эффективности был выбран критерий максимума отношения «сигнал/шум». Необ-

ходимо сделать допущение, что рассматриваемая адаптивная система используется на космическом аппарате, расположенном на геостационарной орбите. В таком случае зона обслуживания (ЗО) и положение ДН антенны статичны.

В общем случае ДН в дальней зоне МЛА при работе в кластере записывается в виде

$$\left| E(W_j, \theta_i, \varphi_i) \right|^2 = \left| \sum_{j=1}^{N_{\text{сгс}}} E_{ij} \cdot W_j \right|^2, \quad (24)$$

где $W_j = A_j \cdot e^{j\varphi_j}$ – весовой коэффициент облучателя; E_{ij} – ДН от j -го облучателя в i -м направлении наблюдения; $\left| E(W_j, \theta_i, \varphi_i) \right|^2$ – требуемая ДН антенны.

Необходимо ограничить амплитуду облучателей, исходя из условия нормировки мощности кластера:

$$\sum_{j=1}^{N_{\text{сгс}}} A_j^2 = 1. \quad (25)$$

Величина E_{ij} является заранее известной величиной и в процессе синтеза АФР является константой для определенной точки θ_i , φ_i . Для ускорения расчета АФР ограничим функцию (24) набором точек, задаваемых программно. В каждой точке известно требуемое значение уровня сигнала.

Набор весовых коэффициентов зададим в виде вектора

$$\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_j]^*{}^T. \quad (26)$$

Для синтеза АФР и формирования провалов ДН применим следующий алгоритм:

1. Алгоритм синтеза начинает работу с некоторого начального состояния, например, синфазное равноамплитудное распределение решетки. Вычисляется разница между полученными значениями и требованиями – ΔE .

2. Из набора ΔE , полученного в п. 1, находится та точка, в которой наблюдается максимальное расхождение начального состояния и требуемого (ΔE_{max}).

3. Вычисляется градиент вектора $\left[\frac{\partial E}{\partial W_1}, \frac{\partial E}{\partial W_2}, \dots \right]$,

$\frac{\partial E}{\partial W_j} \Big|_{\check{N}} = \nabla E$ в точке максимального расхождения.

4. Заменяется вектор-параметр $\mathbf{W}$ его новым значением $\mathbf{W}_1 = \mathbf{W}_0 \pm \alpha \cdot \nabla E$, где α – размер шага.

5. Процесс повторяется до тех пор, пока $\|\mathbf{W}_1 - \mathbf{W}_0\| < \varepsilon$.

Значения α и ε задаются перед началом синтеза.

Для ограничения размеров целевой функции и длительности синтеза АФР расчет проводится в наборе точек. Это позволяет значительно ускорить скорость расчета требуемого АФР и повысить эффективность системы в целом:

$$\left| E_i(\theta, \varphi) \right|^2 = \left| \sum_{n=1}^{N_{\text{сгс}}} W_n E_{ni}(\theta, \varphi) \right|^2. \quad (27)$$

В качестве критерия для синтеза ДН используется коэффициент усиления (КУ) антенны в заданных точках (целях). Кроме того, необходимо модифицировать алгоритм в связи с ограничением количества точек и необходимостью формировать провалы в ДН. Введем понятие «ВК цели», которые будут задавать повышение либо уменьшение уровня сигнала для заданной цели:

- $w > 0$ – повышение уровня сигнала в данной точке, стремление к максимально возможному значению;
- $w < 0$ – подавление сигнала в данной точке, стремление к минимально возможному значению.

На основе вышеизложенных рассуждений запишем целевую функцию алгоритма для синтеза АФР кластера:

$$f_i = w_i \left(|E(\theta, \varphi)_{\text{дй.цел.и}}|^2 - |\dot{L}_i(\theta, \varphi)|^2 \right), \quad (28)$$

где w_i – весовой коэффициент цели; $|E(\theta, \varphi)_{\text{дй.цел.и}}|^2$ – требуемое значение уровня сигнала в данной точке пространства; $|\dot{L}_i(\theta, \varphi)|^2$ – достигнутое значение уровня сигнала в данной точке пространства.

Таким образом, имеется набор значений f_i , соответствующий набору координат в требуемой ЗО.

Цель алгоритма – минимизировать значение функции $F(x)$. Последовательными итерациями подбирается значение параметров для достижения минимального значения целевой функции:

$$F(\bar{x}) = \max \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\}. \quad (29)$$

В качестве первой итерации берется равноамплитудное синфазное распределение решетки облучателей (решетка содержит 19 облучателей). Далее

алгоритм рассчитывает КУ для каждой заданной точки, исходя из равноамплитудного распределения, и находит максимальное значение разницы между требуемым усилением и действительным $\left(|E(\theta, \varphi)_{\text{дй.цел.и}}|^2 - |\dot{L}_i(\theta, \varphi)|^2 \right)$. Затем алгоритм изменяет

значение амплитуды и фазы каждого из лучей для уменьшения разницы между требуемым усилением и действительным. Этот процесс повторяется до тех пор, пока разница между требуемым значением усиления и действительным значением усиления для каждой станции достигнет минимума изменений. Количество итераций можно задавать программно, либо алгоритм сам прекратит свою работу при достижении минимума изменений.

С использованием синтезированного алгоритма выполнен расчет АФР кластера, состоящего из 7 облучателей. Расчет проведен для случая одной помехи в направлении главного лепестка ДН и одной помехи в направлении первого бокового лепестка (рис. 3).

Заключение. Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Антенна обеспечивает формирование провала ДН в направлении главного лепестка ДН и в направлении боковых лепестков минус 45–50 дБ.
2. Наблюдается уменьшение уровня сигнала на 10 % от общей ЗО.
3. Имеется незначительный перепад в уровне сигнала в главном лепестке (не более 1 дБ) за счет задания требования по уровню сигнала в ЗО, не подверженной воздействию помехи.

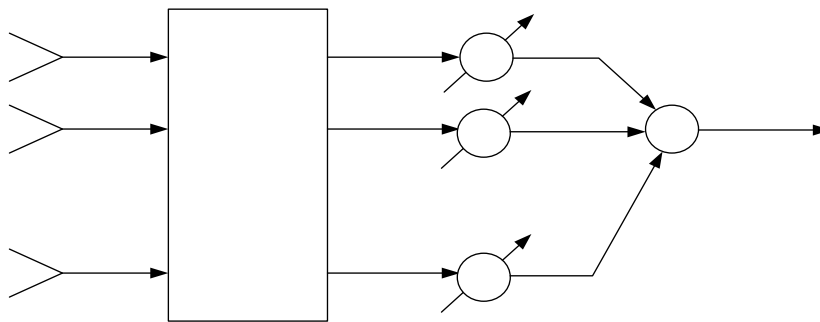


Рис. 2. Структурная схема антенной решетки

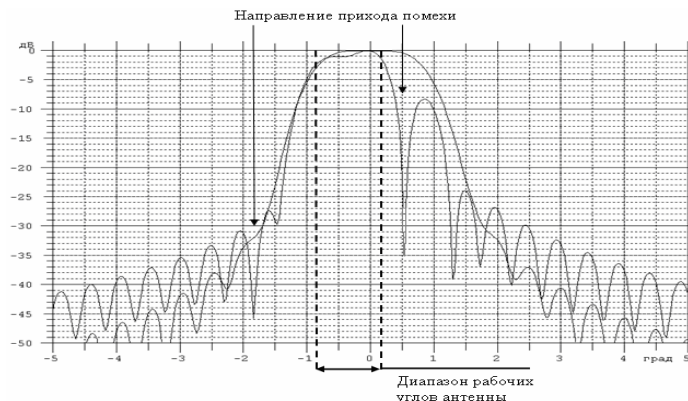


Рис. 3. Результаты синтеза ДН

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0155, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0155).

Acknowledgments. Work is the financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation (agreement No. 14.577.21.0155, unique project identifier RFMEFI57714X0155).

Библиографические ссылки

1. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Першин А. С. Алгоритмы адаптации многолучевых антенн, построенных на базе гибридно-зеркальных антенн // журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2013. Т. 6, № 7. С. 835–844.
2. Джиган В. И., Плетнева И. Д. Линейно-ограниченная фильтрация сигналов в адаптивной антенной решетке для систем цифровой связи // Телекоммуникации. 2008. № 6. С. 2–9.
3. Щесняк С. С., Попов М. П. Адаптивные антенны. СПб.: Изд-во Военной инженерно-космической академии имени А. Ф. Можайского, 1996. 612 с.
4. Джиган В. И., Незлин Д. В. Градиентные алгоритмы в задачах дискретной фазовой адаптации антенных решеток // Радиотехника. 1991. № 5. С. 84–86.
5. Джиган В. И. Многоканальные RLS- и быстрые RLS-алгоритмы адаптивной фильтрации // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 11. С. 48–77.
6. Benvenuto N., Cherubini G. Algorithms for communications systems and their applications. John Wiley and Sons Ltd., 2003. 1285 p.
7. Recursive least squares constant modulus algorithm for blind adaptive array / Y. Chen [et al.]. // IEEE Trans. Signal Processing. 2004. Vol. 52, № 5. P. 1452–1456.
8. Wang L.-K., Schulte M. J. Decimal floating-point division using Newton-Raphson iteration // Proceedings of the 15-th IEEE Intern. Conf. on Application-Specific Systems, Architectures and Processors. 2004. P. 84.
9. Integrated GNSS attitude determination and positioning for direct geo-referencing / N. Nadarajah, J.-A. Paffenholtz, P. J. G. Teunissen // Sensors (Switzerland). 2014. Vol. 14, iss. 7. P. 12715–12734.
10. A new algorithm for GNSS precise positioning in constrained area / S. Carcanague [et al.]. // Institute of Navigation – International Technical Meeting – 2011 (ITM 2011). 2011. Vol. 2. P. 737–745.
11. Карцан И. Н., Карцан Р. В., Ефремова С. В. Подавление помех при использовании антенны интерферометра в НАП // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Ч. 1. СибГАУ. Красноярск, 2013. С. 178–179.
12. Эффективность радионавигационных систем / И. Н. Карцан [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 48–50.
13. Способ настройки адаптивной фазированной антенной решетки навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС / В. Н. Тяпкин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 130–134.
14. Адаптивные многолучевые антенны / Тяпкин В. Н. [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 2(42). С. 106–109.
15. Тяпкин В. Н., Лубкин И. А. Использование рекуррентных адаптивных алгоритмов для решения задачи подавления активно-шумовых помех в системах

спутниковой связи // Вестник СибГАУ. 2010. № 2(28). С. 39–42.

References

1. Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Pershin A. S. [Adaptation algorithms multi-beam antennas based on hybrid-SLR antennas]. *Jurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seria: Tehnika i tehnologii*. 2013, Vol. 6, No. 7, P. 835–844 (In Russ.).
2. Dzhigan V. I., Pletneva I. D. [Linearly-bounded filtering signals in Adaptive antenna array for digital communication systems]. *Telekommunikatsii*. 2008, No. 6, P. 2–9 (In Russ.).
3. Chesnyak S. S., Popov M. P. *Adaptivnye antenno* [Adaptive antennas]. SPb., 1996, P. 612.
4. Dzhigan V. I., Nezlin D. V. [Gradient algorithms in discrete tasks phase adaptation of antenna arrays]. *Radioelektronika*. 1991, No. 5, P. 84–86 (In Russ.).
5. Dzhigan V. I. [Multichannel RLS-and fast RLS - algorithms of adaptive filtering]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki*. 2004, No. 11, P. 48–77 (In Russ.).
6. Benvenuto N., Cherubini G. Algorithms for communications systems and their applications. *John Wiley and Sons Ltd*. 2003, 1285 p.
7. Chen Y., Le-Ngoc T., Champagne B., Xu C. Recursive least squares constant modulus algorithm for blind adaptive array. *IEEE Trans. Signal Processing*. 2004, Vol. 52, No. 5, P. 1452–1456.
8. Wang L.-K., Schulte M. J. Decimal floating-point division using Newton-Raphson iteration. *Proceedings of the 15-th IEEE International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors*. 2004, P. 84.
9. Nadarajah N., Paffenholtz J.-A., Teunissen P. J. G. Integrated GNSS attitude determination and positioning for direct geo-referencing. *Sensors (Switzerland)*. July 2014, Vol. 14, Is. 7, 17, P. 12715–12734.
10. Carcanague S., Julien O., Vigneau W., Macabiau C. A new algorithm for GNSS precise positioning in constrained area. *Institute of Navigation – International Technical Meeting 2011, ITM 2011*. 2011, Vol. 2, P. 737–745.
11. Kartsan I. N., Kartsan R. V., Efremova S. V. [Interference suppression when using antennas Interferometer in NAP]. *Materialy XVII mezhdunarod. nauch. konf. "Reshetnevskie chtenia"* [Proceedings of XVII International. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2013, vol. 1, No. 17, P. 178–179 (In Russ.).
12. Kartsan I. N., Ohotkin K. G. [The effectiveness of radio navigation systems]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3(49), P. 48–50 (In Russ.).
13. Tyapkin V. N., Dmitriev D. D. [How to configure an Adaptive phased array antenna array user GLONASS navigation equipment]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 1(47), P. 130–134 (In Russ.).
14. Tyapkin V. N., Pershin A. S. [Adaptive multi-beam antenna]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 2(42), P. 106–109 (In Russ.).
15. Tyapkin V. N., Lubkin I. A. [Use recurrent Adaptive algorithms for solving the problem of suppression of active jamming of satellite communication systems]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 2(28), P. 39–42 (In Russ.).

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ
СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕХОСНОГО ИМИТАТОРА ДВИЖЕНИЯ**

Д. А. Федченко*, Д. Е. Синицкий

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: Dfed4enko@mail.ru

С целью повышения надежности и качества вновь создаваемых систем ориентации и стабилизации космических аппаратов требуется проведение их всесторонней наземной экспериментальной отработки как в процессе проектирования, так и в процессе производства. При этом эффективность наземной экспериментальной отработки системы ориентации напрямую зависит от точности воссоздания среды её функционирования, что, в свою очередь, требует высокой точности воспроизведения внешних воздействий на чувствительные элементы обрабатываемой системы. Рассматривается вопрос обеспечения точности задания входных воздействий на чувствительные элементы системы ориентации и стабилизации при проведении динамических испытаний на комплексе моделирующих стендов с применением трехосного имитатора движения, построенного на базе трехстепенного карданова подвеса. Приведена процедура расчета и алгоритм формирования управляющих воздействий на трехосный имитатор движения при имитации вектора абсолютной угловой скорости на измерительные каналы прибора, предназначенного для измерения угловой скорости корпуса космического аппарата. Приведены основные преимущества имитатора движения, обусловленные его специфическим конструктивным исполнением. Представлены основные кинематические соотношения и методика выставки трехосного имитатора движения относительно меридиана, позволяющая учитывать влияние угловой скорости вращения Земли на чувствительные оси прибора в процессе формирования управляющего воздействия на имитатор движения, тем самым повышая точность имитации воспроизводимой величины. Решена актуальная задача, которая, с одной стороны, позволяет повысить качество процесса измерения выходных характеристик прибора, а с другой – повысить эффективность наземной экспериментальной отработки системы ориентации и стабилизации. Методом математического моделирования проведена оценка влияния погрешности, вносимой трехосным имитатором движения в процесс измерения динамических характеристик системы ориентации и стабилизации в режиме успокоения. Показано, что расчетные кинематические соотношения и разработанные алгоритмы управления с достаточной точностью воспроизводят имитацию углового движения КА. Погрешность воспроизведения скорости углового вращения в установившемся режиме не превышает 0,1 %.

Ключевые слова: трехосный имитатор движения, динамические испытания системы ориентации, алгоритм управления.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 670–679**ONGROUND TESTING OF SATELLITE ATTITUDE DETERMINATION
AND CONTROL SYSTEM WITH THREE-AXIS MOTION SIMULATOR**

D. A. Fedchenko*, D. E. Sinitskiy

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: Dfed4enko@mail.ru

In order to increase quality and reliability of newly developed satellite attitude determination and control systems (ADCS), on-ground testing is needed during their development as well as manufacturing. Moreover, the effectiveness of ADCS testing directly depends upon the accuracy of its operating environment simulation which requires highly accurate simulation of environmental effects on the sensitive items of the tested system. This article describes provision of accuracy when setting input effects on the ADCS sensitive items while performing dynamic bench tests using three-axis motion simulator which design is based on three-axis Cardan assembly. The article describes the calculation procedure and the algorithm of control input generation that affects the three-axis motion simulator while simulating absolute angular rate vector for the unit measurement channels, intended to measure satellite body angular rate. Motion simulator

main advantages determined by its specific design are given. The article describes main kinematic relations and method of three-axis motion simulator calibration with reference to meridian that allows to take Earth angular rotation rate effect on the unit sensitive axes while the control input, affecting the simulator, is being generated, thus increasing the simulation accuracy. The research resolves an urgent issue which on the one hand allows to increase the quality of unit output performances measurement process, on the other hand it allows to increase effectiveness of ADCS on-ground testing. Effect of uncertainties of the three-axis motion simulator on ADCS dynamic performances measurement process in a damping mode was assessed using mathematical model method. The article also demonstrates that calculated kinematic relations and developed control algorithms simulate satellite angular motion accurately enough. Uncertainty of angular rotation rate in the set mode does not exceed 0.1 %/sec.

Keywords: three-axis motion simulator, attitude control system dynamic tests, control algorithm.

Введение. Система ориентации и стабилизации (СОС) космических аппаратов (КА) является сложной высокоточной системой, состоящей из множества приборов и функциональных связей между ними. Поскольку в процессе эксплуатации КА исключена возможность его обслуживания и ремонта, то требования, предъявляемые к надежности и качеству, особенно высоки. Процесс создания таких систем, в том числе и СОС, обусловлен необходимостью проведения всесторонней наземной экспериментальной отработки и испытаний [1]. Одним из важных этапов наземных испытаний СОС является этап измерения её динамических характеристик, для проведения которого создаются различные лабораторные стенды и комплексы, использующие методы как математического, так и полунатурного моделирования [2]. При этом эффективность использования таких стендов и комплексов в процессе испытаний СОС напрямую зависит от точности воссоздания среды её функционирования, что, в свою очередь, требует высокой точности воспроизведения внешних воздействий на чувствительные элементы СОС в соответствии с расчетными значениями, аналогичными угловому движению реального КА.

В настоящее время имеются сведения о разработанных стендах, обеспечивающих измерения динамических характеристик КА. Вклад в теорию и практику создания таких стендов связан с именами J. L. Schwartz, C. D. Hall (Whorl-I, Whorl-II (США)) [3–6], С. О. Карпенко, М. Ю. Овчинникова [7]. Данные стенды обеспечивают имитацию движения по трем осям, при этом угловое движение по двум осям ограничено из-за конструкции стендов. Данные стенды сложны в настройке и эксплуатации.

В данной статье рассматривается вопрос обеспечения точности задания входных воздействий на чувствительные элементы СОС при проведении динамических испытаний на комплексе моделирующих стендов (КМС) с применением трехосного имитатора движения (ТИД), построенного на базе трехстепенного карданова подвеса. Целью статьи является разработка методики расчета и алгоритма формирования управляющих воздействий на ТИД при имитации вектора абсолютной угловой скорости на измерительные каналы прибора, предназначенного для измерения угловой скорости корпуса КА.

Методика формирования управляющего воздействия на трехосный имитатор движения. Как уже было сказано выше, ТИД представляет собой трехстепенной карданов подвес (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид трехосного имитатора (блок механики и стойка управления)

По внешней и промежуточной оси ТИД установлены рамки, а на его внутренней оси расположена планшайба (посадочная поверхность), на которую устанавливается исследуемый прибор, в данном случае чувствительный элемент СОС: измеритель угловой скорости (ИУС).

Согласно [8] ТИД имеет следующие основные характеристики:

- диапазон углов вращения каждой оси – неограничен;
- погрешность воспроизведения скорости во всем диапазоне – не более 0,01 %;
- точность задания углового отклонения по каждой оси – не более 10''.

Для вывода кинематических уравнений движения ТИД использовались следующие системы координат:

- $X_{БМ}, Y_{БМ}, Z_{БМ}$ – система координат (СК) ТИД;
- X, Y, Z – связанная система координат (ССК) – базовая СК КА.

Взаимное положение ССК и СК ТИД в исходном положении изображено на рис. 2.

Определим кинематические уравнения стенда, для этого спроецируем скорости изменения углов отклонения рамок ТИД на связанные с КА оси X, Y, Z . При двух поворотах на Y_C и X_C получим:

$$\begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos X_C & \sin X_C \\ 0 & -\sin X_C & \cos X_C \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin Y_C \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos Y_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \\ \dot{Z}_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

или

$$\begin{aligned} \omega_X &= \dot{X}_C - \dot{Z}_C \sin Y_C, \\ \omega_Y &= \dot{Y}_C \cos X_C + \dot{Z}_C \cos Y_C \sin X_C, \\ \omega_Z &= \dot{Z}_C \cos Y_C \cos X_C - \dot{Y}_C \sin X_C. \end{aligned} \quad (2)$$

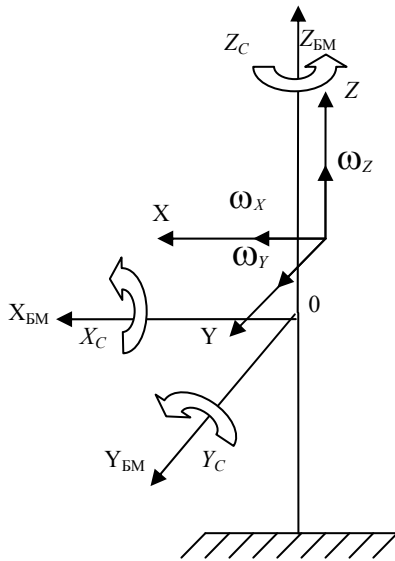


Рис. 2. Взаимное положение ССК и СК БМ:

$X_{БМ}$ – внутренняя ось вращения (ось вращения планшайбы); $Y_{БМ}$ – промежуточная ось вращения (промежуточная рамка); $Z_{БМ}$ – внешняя ось вращения (внешняя рамка); $(\omega_X, \omega_Y, \omega_Z)$ – вектор абсолютной угловой скорости корпуса КА; X_C, Y_C, Z_C – текущие углы поворота рамок ТИД

Из системы уравнений (2), используя метод Крамера [9], получим зависимость скорости изменения углового отклонения рамок ТИД от угловых скоростей КА:

$$\begin{aligned} \dot{X}_C &= \omega_X + (\omega_Y \sin X_C + \omega_Z \cos X_C) \operatorname{tg} Y_C, \\ \dot{Y}_C &= \omega_Y \cos X_C - \omega_Z \sin X_C, \\ \dot{Z}_C &= \frac{\omega_Y \sin X_C + \omega_Z \cos X_C}{\cos Y_C}. \end{aligned} \quad (3)$$

Данные выражения можно представить в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \\ \dot{Z}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin X_C \operatorname{tg} Y_C & \cos X_C \operatorname{tg} Y_C \\ 0 & \cos X_C & -\sin X_C \\ 0 & \frac{\sin X_C}{\cos Y_C} & \frac{\cos X_C}{\cos Y_C} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

При решении матричного уравнения (4) возникают трудности вычислительного характера, а именно, необходимость деления на $\cos Y_C$, который обращается в нуль при $Y_C = 90^\circ$. Также при $Y_C = 90^\circ$ происходит совмещение внутренней оси вращения с внешней осью ТИД, что приводит к потере одной степени свободы. При этом условии кинематические уравнения (4) теряют смысл. Это может стать серьезным препятствием при проведении динамических испытаний СОС при реализации режимов «закрутки» или начальных режимов, в которых происходит набор поисковой скорости в одной из плоскостей КА для поиска опорного ориентира.

Данный недостаток устраняется следующим образом. Учитывая, что в режимах «закрутки» и в режимах поиска ориентира набор скорости происходит не по всем осям и плоскостям КА, необходимо ось КА, относительно которой не происходит набор скорости, направить по оси $Y_{БМ}$, чтобы при проведении режима не достичь угла 90° . Для этого в матричное уравнение (4) введена матрица учета взаимного положения системы координат КА и системы координат ТИД. Также с учетом того, что на ТИД будет устанавливаться ИУС, при формировании уравнений движения учтена матрица взаимного положения системы координат ИУС относительно системы координат КА. Таким образом, с учетом вышесказанного матричное уравнение имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_C \\ \dot{Y}_C \\ \dot{Z}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin X_C \operatorname{tg} Y_C & \cos X_C \operatorname{tg} Y_C \\ 0 & \cos X_C & -\sin X_C \\ 0 & \frac{\sin X_C}{\cos Y_C} & \frac{\cos X_C}{\cos Y_C} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \dot{Y}_0 \\ \dot{Z}_0 \end{bmatrix} \times T_{\text{ИУС}} \times T_{\text{ТИД}} \times \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ТИД}}$ – матрица взаимного положения ССК КА и СК БМ в исходном (нулевом) положении станда; $T_{\text{ИУС}}$ – матрица установки ИУС на КА.

Учет влияния скорости вращения Земли. Как известно, при наземной эксплуатации гироскопические приборы чувствительны к вращению Земли, поэтому немаловажным вопросом при управлении ТИД является учет влияния вектора скорости вращения Земли на измерительные каналы ИУС. Для вывода уравнений компенсации влияния вращения Земли введем опорную систему координат X_0, Y_0, Z_0 .

Взаимное положение опорной СК относительно СК ТИД приведено на рис. 3.

Спроецируем скорости изменения углового отклонения рамок ТИД на опорную систему координат:

$$\begin{aligned} \omega_{X0} &= \dot{X}_C \cos Y_C \cos Z_C + \dot{Y}_C \sin Z_C, \\ \omega_{Y0} &= \dot{Y}_C \cos Z_C - \dot{X}_C \cos Y_C \sin Z_C, \\ \omega_{Z0} &= \dot{Z}_C - \dot{X}_C \sin Y_C, \end{aligned} \quad (6)$$

где ω_{X0} , ω_{Y0} , ω_{Z0} – проекции вектора угловой скорости вращения Земли на опорную систему координат, равные $\omega_{X0} = \omega_E \cos \varphi$; $\omega_{Y0} = 0$; $\omega_{Z0} = \omega_E \sin \varphi$.

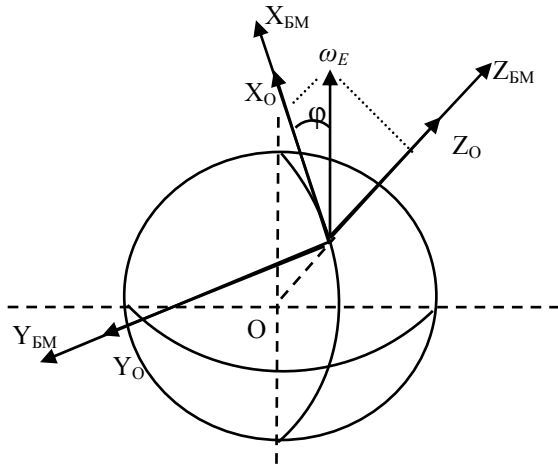


Рис. 3. Исходное положение опорной СК относительно СК ТИД:

ось $X_{БМ}$ направлена по меридиану на север ($X_C = 0^\circ$); $Y_{БМ}$ направлена по горизонту ($Y_C = 0^\circ$); $Z_{БМ}$ перпендикулярна поверхности Земли ($Z_C = 0^\circ$); ω_E – угловая скорость вращения Земли ($0,25 \text{ } ^\circ/\text{с}$); φ – широта установки ТИД: $0,986 \text{ рад} = 56,5^\circ$

Разрешив методом Крамера уравнения (6) относительно скорости изменения углов отклонения рамок ТИД, получим:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta X_{\dot{N}}} \\ \dot{\Delta Y_C} \\ \dot{\Delta Z_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_Z \cos \varphi \frac{\cos Z_C}{\cos Y_C} \\ \omega_Z \cos \varphi \sin Z_C \\ \omega_Z \sin \varphi + \omega_Z \cos \varphi \cos Z_C \operatorname{tg} Y_C \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для того чтобы уравнение (7) имело математический смысл, необходимо, чтобы движение начиналось с исходного (нулевого) положения, при котором направления осей ТИД соответствуют направлению, приведенному на рис. 3. В случае, если направление осей ТИД, отличное от направления, приведенного на рис. 3, процедура выставки по меридиану сводится к повороту ТИД на требуемые углы относительно осей $Z_{БМ}$ и $Y_{БМ}$, при которых ось $X_{БМ}$ будет направлена по меридиану на север. При таком подходе наиболее рациональным методом управления ТИД, согласно [10], является метод позиционного управления. Алгоритм выставки ТИД по меридиану приведен на рис. 4.

В качестве исходных данных для расчета требуемых углов поворота рамок ТИД использована выходная характеристика ИУС (вектор угловой скорости КА в приборной системе координат (ПСК)), поскольку в статическом положении выходная информация прибора ИУС состоит из двух составляющих: первая – собственная погрешность прибора и вторая – влияние вращения Земли (долю последней и необходимо определить).

Алгоритм формирования управляющего воздействия. Кинематическое уравнение движения ТИД (5)

с учетом компенсации скорости вращения Земли в матричном виде будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \dot{X_{\dot{N}}} \\ \dot{Y_C} \\ \dot{Z_C} \end{bmatrix} = \dot{N} \times T_{\dot{A}E} \times \dot{N}_{\dot{C}O\dot{N}} \times \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\Delta X_{\dot{N}}} \\ \dot{\Delta Y_C} \\ \dot{\Delta Z_C} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Блок-схема алгоритма формирования управляющего воздействия на ТИД приведена на рис. 5.

Анализ погрешности, вносимой трехосным имитатором движения в процесс измерения динамических характеристик СОС. Оценка влияния погрешности, вносимой трехосным имитатором движения в процесс измерения динамических характеристик СОС, проверена методом математического моделирования.

Использована следующая методика оценки погрешностей:

- 1) моделируются эталонные процессы динамики объекта в режиме успокоения СОС (успокоение после отделения от ракетносителя) без учета наземных условий (влияния испытательного оборудования);
- 2) моделируются процессы СОС на комплексе моделирующих стендов с введением трехосного динамического стенда, вносящие погрешности в процесс моделирования динамики объекта;
- 3) сравниваются результаты и оценивается доли погрешности, вносимой ТИД.

Для анализа погрешностей использованы следующие модели: математическая модель СОС и математическая модель комплекса моделирующих стендов. При этом объектом исследования является математическая модель комплекса моделирующих стендов, а математическая модель СОС используется для ее замыкания.

Функциональная схема взаимодействия математических моделей в замкнутом контуре и их состав приведены на рис. 6.

Математическая модель СОС. Модель измерителя угловой скорости предназначена для имитации измерения трех проекций угловой скорости на оси связанной с прибором системы координат.

Выходные параметры прибора формируются согласно следующему алгоритму [11]:

1. Вычисляются проекции угловой скорости КА в приборной системе координат (ПСК):

$$\vec{\omega}^{\dot{N}E} = T_{\dot{C}O\dot{C}} \cdot \vec{\omega}_{E\dot{R}}. \quad (9)$$

2. Если текущее значение компонента вектора скорости ω_i в системе координат ИУС больше или равно максимальной скорости линейной зоны ИУС ω_{1i} , то текущему значению присваивается максимальная скорость $\omega_{\max}$, которая может быть измерена.

Модель двигателей ориентации (ДО) предназначена для формирования управляющих моментов двигательной установкой по осям КА. Выходными параметрами модели являются моменты двигателей по осям КА, которые вычисляются согласно алгоритму, приведенному в [12].

Модель БПО СОС предназначена для моделирования логики функционирования системы, в частности, функционирования системы в режиме успокоения. Целью режима является гашение угловых скоростей спутника по каналам тангажа, крена и рыскания до величины скорости, не превышающей 0,02 °/с. Закон управления СОС в режиме успокоения согласно [13] имеет вид

$$\tau_X = -\frac{P_{\min}}{P} \cdot K_X^{\ddot{A}} \cdot \omega_X; \quad \tau_Y = -\frac{P_{\min}}{P} \cdot K_Y^{\ddot{A}} \cdot \omega_Y;$$

$$\tau_Z = -\frac{P_{\min}}{P} \cdot K_Z^{\ddot{A}} \cdot \omega_Z, \quad (10)$$

где τ_X, τ_Y, τ_Z – длительность включения двигателей ориентации; $[K_X^{\ddot{A}}; K_Y^{\ddot{A}}; K_Z^{\ddot{A}}]$ – коэффициенты демпфирования; $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ – текущие измеренные угловые скорости; $P_{\min}$ – номинальное значение тяги двигателей ориентации на конец САС; P – текущее измеренное значение тяги двигателей.

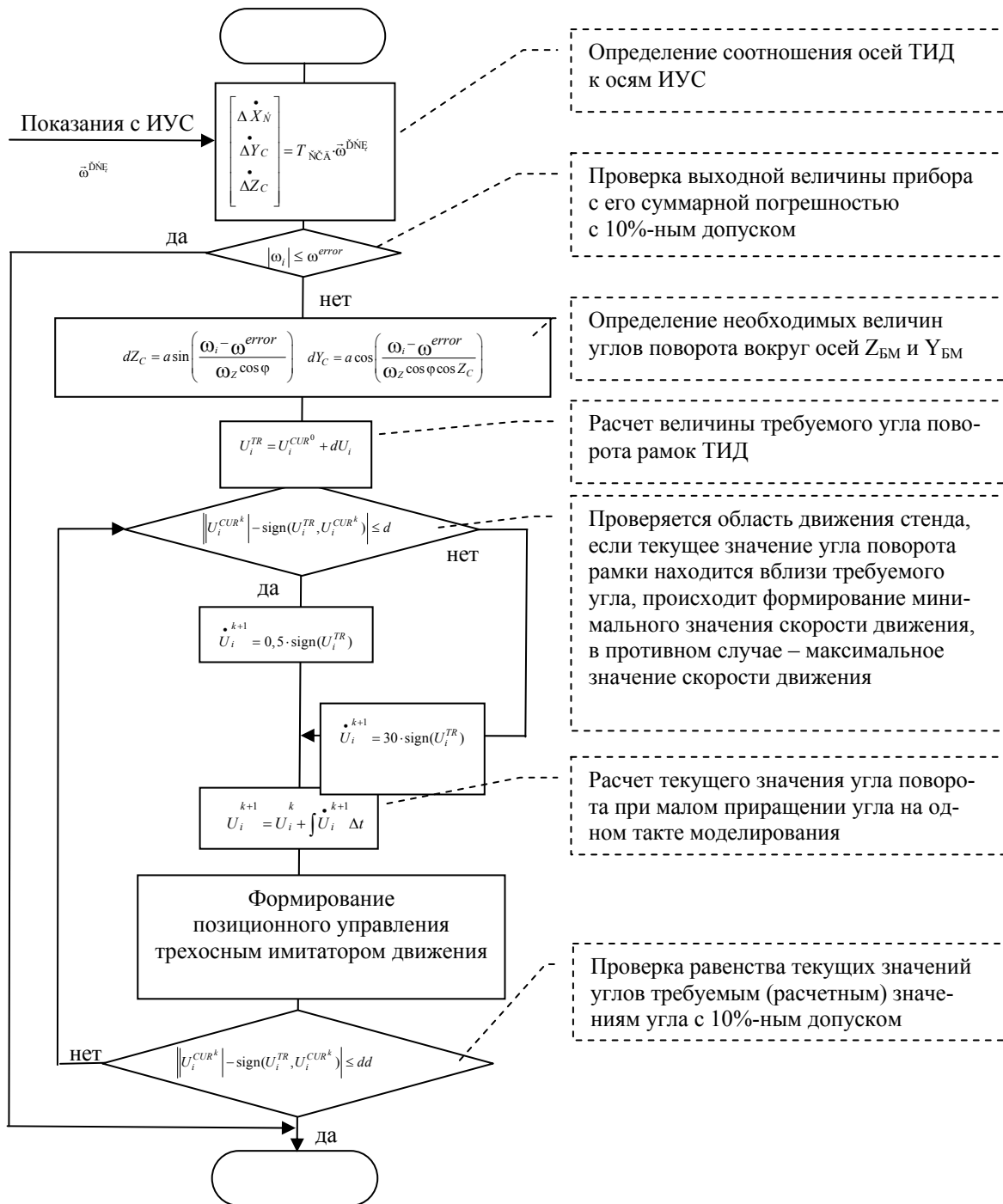


Рис. 4. Алгоритм выставки ТИД по меридиану

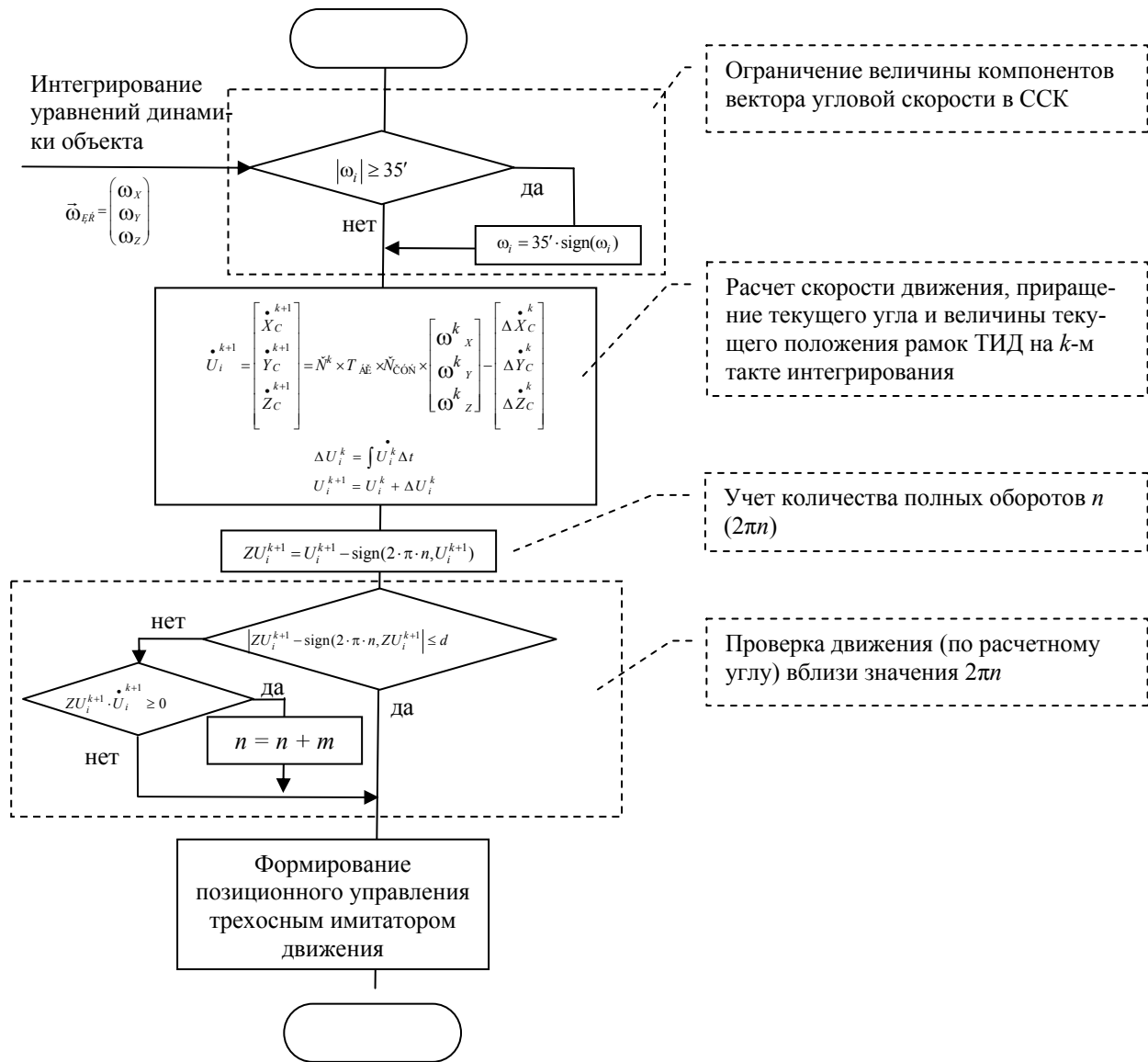


Рис. 5. Алгоритм формирования управления

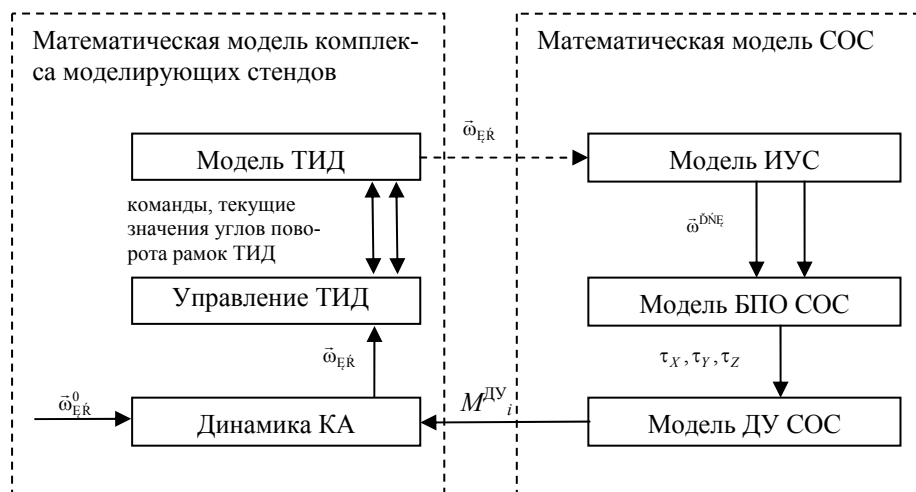


Рис. 6. Функциональная схема взаимодействия моделей в замкнутом контуре:

τ_x, τ_y, τ_z – длительности включения двигателей; $\vec{\omega}_{E\dot{R}}^{\text{ДУ}}$ – вектор угловой скорости КА в системе координат ИУС; $\vec{\omega}_{E\dot{R}}$ – вектор абсолютной угловой скорости в системе координат КА; $M_i^{\text{ДУ}}$ – момент, создаваемый двигательной установкой ($i = X, Y, Z$)

Временная диаграмма съема информации и выдачи управляющих воздействий СОС показана на рис. 7.

Математическая модель КМС. Уравнение динамики корпуса объекта согласно [14; 16] можно задать системой дифференциальных уравнений Эйлера:

$$\begin{aligned} J_X \dot{\omega}_X - (J_Z - J_Y) \omega_Y \omega_Z &= M_X^{\ddot{\alpha}0}, \\ J_Y \dot{\omega}_Y - (J_X - J_Z) \omega_Z \omega_X &= M_Y^{\ddot{\alpha}0}, \\ J_Z \dot{\omega}_Z - (J_Y - J_X) \omega_Y \omega_X &= M_Z^{\ddot{\alpha}0}, \end{aligned} \quad (11)$$

где J_X, J_Y, J_Z – моменты инерции КА относительно осей OX, OY и OZ ; $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ – проекции абсолютной угловой скорости КА относительно осей OX, OY и OZ ; $M_X^{\ddot{\alpha}0}, M_Y^{\ddot{\alpha}0}, M_Z^{\ddot{\alpha}0}$ – проекции момента от ДУ СОС на оси OX, OY, OZ .

Величины проекций абсолютной угловой скорости КА определяются путем интегрирования уравнений (11), разрешенных относительно $\dot{\omega}_i$, методом Рунге–Куты [15]:

$$\omega_i = \frac{dM_i^{\ddot{\alpha}0} + G_i}{J_i} \quad (12)$$

где

$$dM_i^{\ddot{\alpha}0} = FDO_i \left(\int (d\tau_i \cdot \text{sign} D_i) \right); \quad (13)$$

FDO_i – момент, который должны создавать двигатели ориентации относительно осей OX, OY и OZ ; $d\tau_i$ – время включения i -го двигателя; $\text{sign} D_i$ – знак момента, создаваемого i -м двигателем относительно связанной с КА системой координат;

$$\begin{aligned} G_X &= (J_Z - J_Y) \omega_Y \omega_Z, \\ G_Y &= (J_X - J_Z) \omega_Z \omega_X, \\ G_Z &= (J_Y - J_X) \omega_Y \omega_X. \end{aligned} \quad (14)$$

Для более точного воспроизведения углового отклонения согласно [11] используется позиционное управление ТИД:

$$UU_i = K0 \cdot \dot{U}_i + K1 \cdot (ZU_i - \alpha_i), \quad (15)$$

где $i = X, Y, Z$ – оси вращения ТИД; $K1, K0$ – постоянные коэффициенты регулятора; ZU_i – заданное угловое положение i -й оси вращения (программный угол); α_i – показания датчика угла сенда.

Временная диаграмма опроса и выдачи сигналов на ТИД приведена на рис. 8.

Математическая модель ТИД включает в себя следующие модели:

1) математическая модель привода ТИД (с учетом коэффициента усиления и постоянной времени апериодического звена);

2) математическая модель датчика угла ТИД (с учетом люфтов на выходных валах ТИД и цены младшего разряда);

3) математическая модель трехосного карданова подвеса (предназначена для согласования и привязки модели привода ТИД с моделью ИУС через матрицу направляющих косинусов, с учетом погрешности неперпендикулярности осей ТИД).

Результаты моделирования эталонных переходных процессов и процессов с учетом погрешностей ТИД представлены на рис. 9, где показаны изменения угловой скорости по рысканию, крену и тангажу.

При моделировании переходных процессов СОС в режиме успокоения с учетом погрешностей ТИД в общей системе дифференциальных уравнений интегрировались уравнения динамики приводов ТИД с тактом интегрирования 250 мс (имитация работы программного обеспечения комплекса моделирующих стендов) и уравнения динамики объекта с тактом 50 мс (имитация работы реальных устройств).

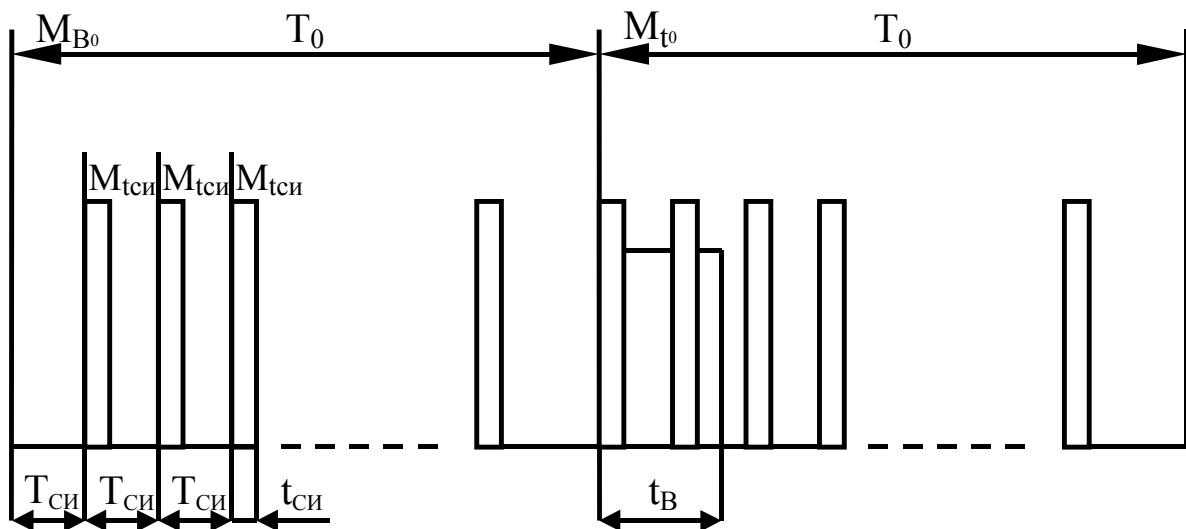


Рис. 7. Диаграмма съема информации и выдачи управляющих воздействий:

T_0 – период дискретности системы: вычисления и выдачи управляющих воздействий; $T_{\text{ци}}$ – период съема информации с приборов СОС; $t_{\text{в}}$ – время вычисления и выдачи управляющих воздействий; $t_{\text{ци}}$ – время съема информации с приборов СОС; $M_{t0}, M_{\text{тци}}$ – метки времени с периодом $T_0, t_{\text{ци}}$ соответственно

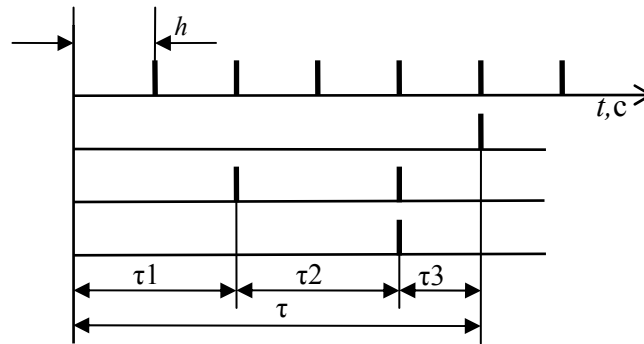


Рис. 8. Временная диаграмма опроса и выдачи управления на испытательное оборудование:

h – шаг интегрирования общей системы дифференциальных уравнений динамики; τ – шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений управления ТИД; τ_1 – время съема и обработки сигналов ТИД; τ_2 – время на вычисление управления; τ_3 – время обработки и выдачи сигналов на ТИД

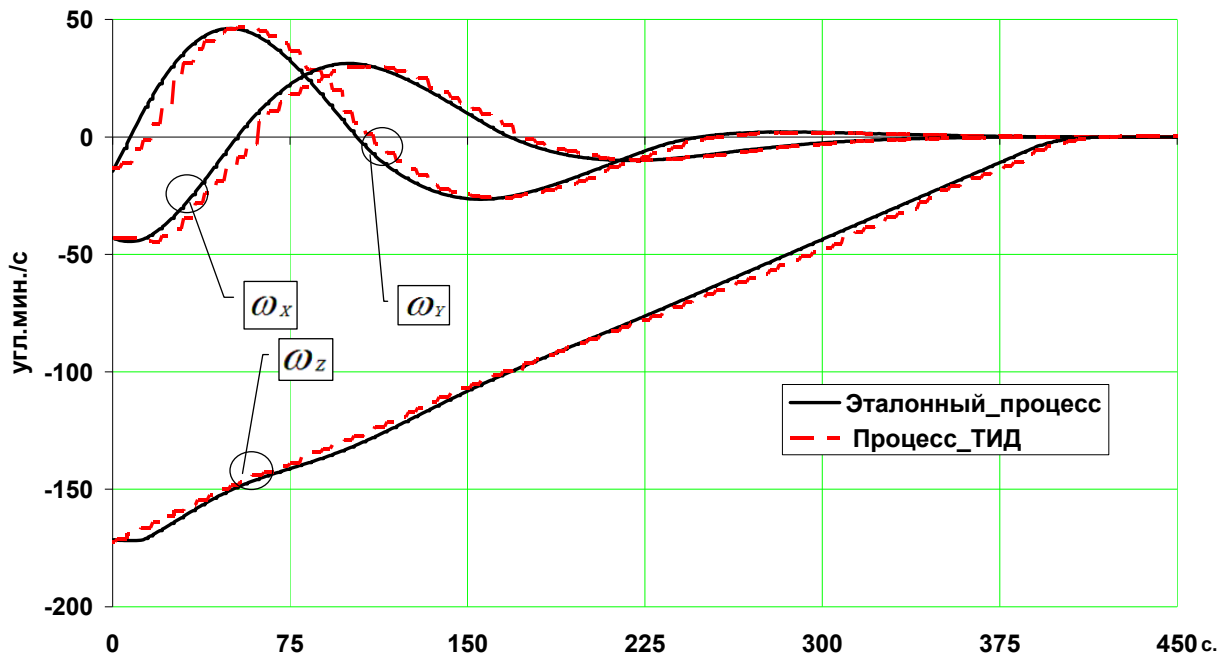


Рис. 9. Динамическая характеристика СОС в режиме успокоения

Анализ результатов показал, что максимальная относительная погрешность воспроизводимой скорости на начало режима составляет порядка 10 %/с. Полученная погрешность обусловлена большим значением управляемой величины, которая с учетом шага интегрирования дифференциальных уравнений 250 мс составляет основное значение ошибки расхождения (порядка 98 % ошибки), остальная погрешность вносится инерционностью позиционного контура ТИД, погрешностью выставки ТИД по меридиану и перпендикулярностью осей ТИД (которая, в свою очередь, является незначительной). При этом характер и общая картина прохождения переходного процесса с учетом погрешностей не искажается. Данная погрешность (порядка 10 %/с) не влияет на анализ и отработку режима СОС, так как основным критерием оценки режима успокоения является время переход-

ного процесса, за период которого происходит гашение угловой скорости.

В установившемся процессе (при гашении угловой скорости корпуса КА до требуемой величины) значение погрешности не превышает 0,1 %/с по всем каналам (рыскания, крена и тангажа). С учетом требований, предъявляемых к СОС в режиме успокоения, а именно, гашение угловой скорости корпуса КА до величины 0,02 °/с, воспроизведение величины угловой скорости с точностью 0,1 %/с вполне достаточно. В установившемся процессе (при малых значениях угловой скорости) основной составляющей ошибки измеряемой величины является погрешность выставки ТИД по меридиану (порядка 70 % ошибки), остальные ошибки вносятся тактом интегрирования уравнений динамики ТИД и инерционностью позиционного контура управления.

Заключение. Получены дифференциальные уравнения и разработан алгоритм управления трехосным имитатором движения, позволяющие использовать имитатор при проведении динамических испытаний систем ориентации и стабилизации в режимах, при моделировании внешнего воздействия на измеритель угловой скорости в виде имитации углового вращения корпуса КА. Разработан алгоритм выставки имитатора относительно меридиана с учетом влияния вращения Земли, позволяющий повысить точность имитации и, как следствие, повысить качество наземных полунатурных испытаний системы.

Результаты моделирования показали, что предложенный подход с достаточной точностью воспроизводит имитацию углового движения, а погрешность, вносимая ТИД в процесс имитации, не оказывает влияния на процессы управления СОС в целом. Основная составляющая погрешности, вносимая КМС, – это погрешность, вызванная дискретностью процесса интегрирования дифференциальных уравнений управления трехосным имитатором движения. Остальные погрешности, такие как неперпендикулярность осей ТИД, не вносят существенных искажений в воспроизводимый процесс.

Полученные погрешности определяются расчетом и могут быть использованы в качестве поправок для уточнения результатов динамических испытаний СОС на комплексе моделирующих стендов, имеющем в своем составе ТИД.

Библиографические ссылки

1. Евтифьев М. Д. Испытания ракетно-космической техники : учеб. пособие / СибГАУ. Красноярск, 2004. 308 с.
2. Дернов С. А., Туляков А. М., Федченко Д. А. Применение полунатурного моделирования для наземной отработки систем ориентации космических аппаратов нового поколения // Материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Железногорск, 2008. С. 29–30.
3. Development of Air Spindle and Triaxial Air Bearing Test beds for Spacecraft Dynamics and Control Experiments / S. Dennis [et al.] [Электронный ресурс] // Proceedings of the American Control Conference Arlington, VA (June 25–27, 2001). URL: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=946287&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D946287 (дата обращения: 15.12.2014).
4. Schwartz J. L., Hall C. D. The Distributed Spacecraft Attitude Control System Simulator: Development, Progress, Plans [Электронный ресурс] // Flight Mechanics Symposium / Goddard Space Flight Center. (Greenbelt, Maryland, October 28–30, 2003). URL: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/FMS03.pdf> (дата обращения: 22.11.2014).
5. Schwartz J. L., Hall C. D. Comparison of System Identification Techniques for a Spherical Air-Bearing Spacecraft Simulator [Электронный ресурс] // AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference, Big Sky. (Montana, August 2003). URL: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS03-611.pdf> (дата обращения: 22.11.2014).

aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS03-611.pdf (дата обращения: 22.11.2014).

6. Schwartz J. L., Hall C. D. System Identification of a Spherical Air-Bearing Spacecraft Simulator [Электронный ресурс] // AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Maui, Hawaii, 2004. URL: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS04-122.pdf> (дата обращения: 22.11.2014).

7. Карпенко С. О., Овчинников М. Ю. Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников : препринт ИМП им. М. В. Келдыша РАН. М., 2008. 30 с.

8. Трехосевой стенд серии АС3337 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.acutronic.com/ru/produkcija/3-osevye-stendy.html> (дата обращения: 19.08.2013).

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1974. 832 с.

10. Калихман Д. М. Позиционные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / под общ. ред. акад. В. Г. Пешехонова. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 296 с.

11. Спутник «AMOS-5». Наземный отладочный комплекс. Подсистема ориентации и стабилизации. Программная модель. Исходные данные на разработку / АО «Информационные спутниковые системы имени ак. М. Ф. Решетнева». Железногорск, 2009. 97 с. Инв. № AMOS5.ИД НА МОДЕЛЬ СОС.

12. Синицкий Д. Е., Мурыгин А. В. Моделирование работы двигательной установки космического аппарата при наземных испытаниях [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10322>. (дата обращения: 10.02.2015).

13. Платформа «ЭКСПРЕСС-1000Н». Подсистема ориентации и стабилизации. Программное обеспечение : документ детального проекта / АО «Информационные спутниковые системы имени ак. М. Ф. Решетнева». Железногорск, 2011. 415 с. Инв. № 765-DD-43360-ISS-00222.

14. Белецкий В. В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М. : Наука, 1965. 416 с. Сер. «Механика космического полета».

15. Борисов А. В., Мамаев И. С. Динамика твердого тела. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2001. 384 с.

16. Киреев В. И., Пантелеев А. В. Численные методы в примерах и задачах : учеб. пособие. 3-е изд. М. : Высш. шк., 2008. 480 с. : ил.

References

1. Yevtif'yev M. D. *Ispytaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki* [The test rocket and space technology]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2004, 308 p.
2. Dernov S. A., Tulyakov A. M., Fedchenko D. A. [Application of HIL for ground tests of the orientation of a new generation of spacecraft]. *Nauch.-tekhn. Konf. molodykh spetsialistov OAO "Informatsionnyye sputnikovyye sistemy" imeni akademika M. F. Reshetneva* [Scientific-technical conference of young specialists JSC "Information Satellite Systems" Academician

M. F. Reshetnev"]. Zheleznogorsk, JSC "Information Satellite Systems" publ., 2008, P. 29–30 (In Russ.).

3. Development of Air Spindle and Triaxial Air Bearing Test beds for Spacecraft Dynamics and Control Experiments/ Dennis S. Bernstein, N. Harris McClamroch, and Anthony Bloch/ Proceedings of the American Control Conference Arlington, VA June 25–27, 2001. Available at: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=946287&url=http%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D946287 (accessed: 15.12.2014).

4. Schwartz J. L., Hall C. D. The Distributed Spacecraft Attitude Control System Simulator: Development, Progress, Plans, 2003 / Flight Mechanics Symposium. Goddard Space Flight Center. – Greenbelt, Maryland, October 28–30, 2003. Available at: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/FMS03.pdf> (accessed: 22.11.2014).

5. Schwartz J. L., Hall C. D. Comparison of System Identification Techniques for a Spherical Air-Bearing Spacecraft Simulator: AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference, Big Sky. – Montana, August 2003. Available at: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS03-611.pdf> (accessed: 22.11.2014).

6. Schwartz J. L., Hall C. D. System Identification of a Spherical Air-Bearing Spacecraft Simulator: AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. – Maui, Hawaii, February 2004. Available at: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/AAS04-122.pdf>. (accessed: 22.11.2014).

7. Karpenko S. O., Ovchinnikov M. Yu. *Laboratorniy stend dlya polunaturnoy otrabotki sistem oriyentatsii mikro i nanosputnikov* [Laboratory Facility for Testing of Micro- and Nanosatellite Attitude Control Systems]. Moscow, Preprint IMP im. M. V. Keldysheva RAN Publ., 2008. 30 p.

8. *Trekh – osevoy stend serii AC3337* [Three - axis stand Series AC3337] (In Russ.). Available at: <http://www.acutronic.com/ru/produkcija/3-osevye-stendy.html> (accessed: 19.08.2013).

9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 832 p.

10. Kalikhman D. M. *Pozitsionniye upravlyaemiye stendy dlya dinamicheskikh ispytaniy giroskopicheskikh priborov* [The position control stands for dynamic testing of gyroscopes]. Ed. V. G. Peshekhonova, St.Petersburg, GNTS RF TSNII "Elektropribor" Publ., 2008, 296 p.

11. *Sputnik "AMOS-5" Nazemniy otladochniy kompleks. Podсистема oriyentatsii i stabilizatsii. Programmnaya model'*. *Iskhodniye danniy na razrabotku* [The satellite "AMOS-5" Ground debug complex. Subsystem orientation and stabilization. The programming model. The initial data for the development]. Zheleznogorsk, JSC "Information Satellite Systems" Publ., 2009, 97 p., Inv. № AMOS5.ID NA MODEL' SOS.

12. Sinitskiy D. E., Murygin A. V. [Simulation of the propulsion system of the spacecraft in ground tests]. *Sovremenniy problemey nauki i obrazovaniya*. 2013, No. 5 (In Russ.). Available at: <http://www.science-education.ru/111-10322> (accessed: 10.02.2015).

13. *Platforma "EKSPRESS-1000N". Podсистема oriyentatsii i stabilizatsii. Programmnoye obespecheniye. Dokument detal'nogo proekta* [The platform "Express-1000H". Subsystem orientation and stabilization. Software. Document detailed design]. Zheleznogorsk, JSC "Information Satellite Systems" Publ., 2011, 415 p., Inv. № 765-DD-43360-ISS-00222.

14. Beletskiy V. V. *Dvizheniye iskusstvennogo sputnika otnositel'no tsentra mass* [The movement of an artificial satellite of the center of mass]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 416 p.

15. Borisov A. V., Mamayev I. S. *Dinamika tverdogo tela* [Rigid body dynamics]. Izhevsk, NITS "Regulyarnaya i khaotichnaya dinamika" Publ., 2001. 384 p.

16. Kireyev V. I., Panteleyev A. V. *Chislenniy metody v primerakh i zadachakh* [Numerical methods in examples and problems]. Moscow, Vyssh. Shk. Publ., 2008, 480 p.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ДОЖИГАНИЯ ВОДОРОДА,
НАГРЕВАЕМОГО В РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ ЗА СЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

С. Л. Финогенов*, А. И. Коломенцев, О. И. Кудрин

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет) «МАИ»
Российская Федерация, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
*E-mail: sfmai2015@mail.ru

Рассматривается солнечный тепловой ракетный двигатель (СТРкД) с нагревом в высокотемпературной системе «концентратор–приемник» водорода с возможностью его последующего дожигания холодным на входе окислителем. В качестве окислителей предлагаются такие компоненты, как фтор и перекись водорода, образующие с водородом высокоэнергетические топливные пары с большим стехиометрическим соотношением, что позволяет уменьшить требуемые габариты зеркального концентратора солнечной энергии как одного из наиболее критичных элементов двигателя. Представлены результаты оптимизации показателей системы «концентратор–приемник» по критерию максимума массы полезной нагрузки в задаче выведения на геостационарную орбиту для случаев равнотемпературного (с однородным нагревом) одноступенчатого приемника и неравнотемпературного приемника со ступенями нагрева (с неоднородным нагревом) применительно к использованию металлического и пленочного концентратора. Показано, что требования к точности концентратора и системе слежения его за Солнцем оказываются достаточно жесткими. Снижение размеров солнечного концентратора при дожигании нагретого водорода упрощает его создание и улучшает эксплуатацию при работе в космических условиях, в частности, улучшает инерционные характеристики СТРкД при работе в составе космического аппарата и упрощает ориентацию на Солнце. Приведены сравнительные характеристики использования СТРкД как подсистемы космического аппарата для случаев металлического и пленочного концентраторов при равнотемпературном и неравнотемпературном нагреве водорода и его дожигании рассматриваемыми окислителями. Требуемая площадь концентратора в случае использования фтора может быть значительно – на 25 % и более – снижена по сравнению с кислородно-водородным СТРкД. Использование перекиси водорода в некоторых задачах позволяет на 10–12 % снизить площадь концентратора по сравнению с кислородно-водородным СТРкД. Показано, что полезный груз, выводимый на геостационарную орбиту, в случае фторводородного СТРкД с пленочным концентратором и неоднородным нагревом может быть увеличен более чем на 70 % по сравнению с использованием кислородно-водородного ЖРД.

Ключевые слова: солнечный тепловой ракетный двигатель, дожигание водорода, система «концентратор–приемник», окислитель, фтор, перекись водорода.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 680–689**USE OF DIFFERENT OXIDIZERS FOR AFTERBURNING OF HYDROGEN
HEATED BY SOLAR ENERGY IN ROCKET ENGINE**

S. L. Finogenov*, A. I. Kolomentsev, O. I. Kudrin

Moscow Aviation Institute
(National research university) "MAI"
4, Volokolamskoe shosse, A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation
*E-mail: sfmai2015@mail.ru

Solar thermal propulsion (STP) with heating of hydrogen in high-temperature "concentrator–absorber" system with the possibility of its subsequent afterburning with cold oxidizer is considered. Such components as fluorine and hydrogen peroxide are suggested as oxidizers. These oxidizers create high-energetic propellant compounds with hydrogen and have high stoichiometric ratios, that allow to reduce required overall dimensions of solar energy mirror concentrator, as one of the most critical elements of STP. Results of parameters optimization of concentrator-absorber system by criterion of maximum of payload weight in the task of payload injection into geostationary orbit for the cases of isothermal (uniform) single-stage absorber and non-isothermal absorber with heating stages (non-uniform heating) use with reference to use of metal or film concentrator are presented. It is shown that requirements to accuracy of concentrator and its tracking system to the Sun are rather high. Decrease of dimensions of solar concentrator at afterburning

of heated hydrogen simplifies its creation and improves operation in space conditions, in particular improves inertial characteristics of the STP as a part of space vehicle and simplify orientation to the Sun. Comparative characteristics of the STP use as space vehicle subsystem for the cases of metal and film concentrators are presented at isothermal and not isothermal heating of hydrogen and its afterburning by the considered oxidizers. The required area of concentrator in the case of fluorine use can be significantly reduced (up to 25 % and more) in comparison with oxygen-hydrogen STP. Use of hydrogen peroxide in some tasks allows 10...12 % reduction of the concentrator area as compared to oxygen-hydrogen STP. It is shown that payload injected into geostationary earth orbit, in the case of fluorine-hydrogen STP with film concentrator and non-uniform heating, can be increased up to 70 % and higher in comparison with the use of oxygen-hydrogen liquid propellant rocket engine.

Keywords: solar thermal propulsion, hydrogen afterburning, concentrator-absorber system, oxidizer, fluorine, hydrogen peroxide.

Введение. В настоящее время в нашей стране и за рубежом разработка солнечного теплового ракетного двигателя (СТРКД) находится на стадии поисковых исследований. В Российской Федерации этой проблемой занимаются Центр Келдыша, РКК «Энергия», МАИ, МГТУ им. Н. Э. Баумана и другие организации [1–8]. Зарубежные исследования проводятся в США (NASA Marshall Space Flight Center, Boeing, USAF), Европейском Союзе (ESA) и Японии (National Space Laboratory) [9–15]. Интерес к СТРКД как двигателю космического назначения вызван его высоким удельным импульсом (850–900 с и более), что позволяет доставлять на высокие орбиты полезные грузы, в 1,5–2 раза большие по сравнению с использованием жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), либо использовать ракеты-носители (РН) более легкого класса с солнечно-термической верхней ступенью. В результате удельная стоимость выведения полезных грузов на высокоэнергетические орбиты может быть существенно снижена.

Наименее разработанным элементом СТРКД является солнечный высокотемпературный источник мощности, включающий концентратор зеркального типа и приемник солнечного излучения, создание которых представляет достаточно сложную конструкторскую, технологическую и материаловедческую задачу. Поэтому актуальным является определение путей упрощения создания системы «концентратор–приемник» (КП), прежде всего снижения размера солнечного концентратора как достаточно сложного элемента двигателя.

В работах, выполненных в разных организациях, в частности, МАИ, Центре Келдыша, National Space Laboratory (Япония), показана целесообразность дожигания разогретого за счет солнечной энергии рабочего тела холодным на входе окислителем (кислородом) [1; 2; 4–7; 15; 16]. Это позволяет снизить как количество хранимого на борту криогенного водорода и уменьшить габариты топливных баков, так и использовать солнечный источник мощности меньшей размерности. В отличие от концепции, выдвинутой Центром Келдыша, в которой нагрев водорода осуществляется за счет электрической энергии солнечных батарей [4–7], в рассматриваемом случае следует рассматривать влияние дожигания на характеристики системы КП как источника мощности. Требуемый для нагрева необходимого расхода водорода размер зеркала может быть существенно уменьшен. Тогда вопрос о создании концентратора на начальных ста-

диях разработки может заметно облегчиться. Уменьшение размера концентратора приведет к улучшению инерционных характеристик СТРКД, упрощению системы его ориентации на Солнце и управляемости изделия в целом.

Использование окислителей с высоким энергетическим и большим стехиометрическим соотношением компонентов позволяет при заданной тяге снизить расход нагреваемого водорода и уменьшить тем самым требуемый размер солнечного концентратора. В качестве окислителей кроме кислорода могут рассматриваться, в частности, фтор (стехиометрическое соотношение с водородом $K_{mo} = 18,86$) и его соединения, перекись водорода ($K_{mo} = 12,09$) и др. Такой СТРКД с дожиганием может рассматриваться как жидкостный ракетный двигатель с увеличенной энтальпией топлива. Удельный импульс этого двигателя может быть значительно выше по сравнению с кислородно-водородными ЖРД. В отличие от чисто химического двигателя, в случае СТРКД в полной энтальпии топлива значительную долю занимает тепловая энергия нагретого водорода, поэтому теплотворная способность топлива влияет на величину удельного импульса в меньшей степени, и выбор окислителя может с большим основанием осуществляться в том числе с учетом величины соотношения массовых расходов компонентов. Кроме того, необходимо отметить, что повышенная плотность топлива $H_2 + F_2$ или $H_2 + H_2O_2$, по сравнению с компонентами $H_2 + O_2$, облегчает задачу его выведения на исходную опорную орбиту.

Показатели системы «концентратор–приемник». Показатели системы КП должны быть оптимизированы с учетом назначения двигателя как подсистемы космического аппарата (КА) и рассмотрения траекторных условий. Будем рассматривать задачу выведения полезной нагрузки (ПН) на геостационарную орбиту (ГСО) с использованием водородного СТРКД в качестве маршевого двигателя верхней ступени (разгонного блока) РН «Протон-М» при запуске с космодрома Байконур. Энергетически выгодным здесь является многоразовый межорбитальный перелет с периодическими включениями СТРКД в соответствующих апсидальных областях переходных орбит [3–7; 9–14; 16]. С целью сокращения продолжительности выведения, время каждого включения двигателя целесообразно повышать по мере увеличения большой полуоси текущей переходной орбиты, однако

оно не должно быть слишком большим во избежание чрезмерного роста гравитационных потерь. Общее время выведения приемлемым равным 60 суткам как рациональное, при увеличении которого характер роста массы ПН ($M_{\text{пн}}$) приближается к асимптотическому.

Результаты оптимизации по критерию максимума $M_{\text{пн}}$ для рассматриваемой задачи основных показателей системы КП применительно к различным типам приемника и концентратора представлены в таблице, из которой следует, что требования к системе КП являются достаточно жесткими. Важным является снижение требуемой точности концентратора (увеличение параметра $\Delta\alpha$ [1; 2], что соответствует уменьшению концентрации излучения) при увеличении числа ступеней нагрева водорода в приемнике (повышении степени его неравнотемпературности, когда распределение температуры по поверхности приемника соответствует закону распределения энергии в фокальном световом пятне [2; 3]), особенно в случае пленочного концентратора. При этом снижается удельная масса зеркала, которая может достигать 0,5–1,1 кг/м² в случае пленочного концентратора и неравнотемпературного приемника ступенчатого (неоднородного) нагрева.

Важными при разработке СТКД являются проблемы создания системы наведения на Солнце, системы слежения за Солнцем при постоянном изменении ориентации КА относительно Солнца. Следует отметить, что максимальный угол дезориентации системы КП от прицельного направления на Солнце в динамическом режиме может составлять до 1°–1,5° (статический режим сложно реализуем из-за значительно меньших допустимых углов слежения за Солнцем) и определяется условием допустимого снижения энергетической эффективности системы КП при изменении условий облученности в фокальном световом пятне, что вполне может быть достигнуто современными техническими средствами (особенно в случае приемника с неоднородным нагревом водорода) [17].

Использование фтора как окислителя в СТКД. Использование топливной пары фтор–водород заставляет обратиться к опыту НПО «Энергомаш», имеющего практический опыт создания мощных криогенных ЖРД на этих компонентах. В данной статье рассматривается двигатель ограниченной тяги

(десятки-сотни Ньютон) с дожиганием нагретого водорода для повышения экономичности двигателя.

Вследствие большого различия в стехиометрическом соотношении компонентов для топлива H_2+O_2 и H_2+F_2 сравнительные зависимости для удельного импульса удобно строить как функции от соотношения расходов компонентов, а не от коэффициента избытка окислителя. Графики на рис. 1 показывают, что более высокая энергетика топливной пары H_2+F_2 начинает заметно проявляться, начиная с соотношения массовых расходов компонентов $K_m = 5\text{--}6$, что для топлива H_2+O_2 соответствует коэффициенту избытка окислителя $\alpha = 0,6\text{--}0,75$ (для компонентов H_2+F_2 это соответствует $\alpha = 0,25\text{--}0,3$).

Сравним возможности применения кислорода и фтора как окислителей в СТКД в полетных задачах. Как видно из рис. 2, по сравнению с использованием перспективного разгонного блока типа КВРБ с кислородно-водородным ЖРД типа КВД-1, позволяющим в составе РН «Протон-М» выведение на ГСО полезной нагрузки массой до 4200 кг, использование разгонного блока на базе СТКД с тяжелым металлическим концентратором (например, складного типа) может оказаться целесообразно только в случае неравнотемпературного приемника солнечного излучения. По сравнению с ЖРД на фторводородных компонентах (возможная масса ПН в данной задаче около 4600 кг) область рациональных величин α для СТКД уменьшается, и в случае металлического концентратора она ограничена значениями коэффициента избытка окислителя $\alpha = 0\text{--}0,2$ ($K_m = 0\text{--}3,8$) для фторводородного СТКД с одноступенчатым приемником (однородный нагрев водорода) и $\alpha \leq 0,5\text{--}0,6$ ($K_m \leq 9\text{--}11$) для случая приемника с предельной неравнотемпературностью (когда считается, что перетекание тепла от центра к периферии приемника отсутствует [2]). Для кислородно-водородного СТКД с приемником этого типа целесообразны значения $\alpha \leq 0,7\text{--}0,8$ ($K_m \leq 5,5\text{--}6,4$). В этих случаях сохраняется заметный устойчивый выигрыш в массе ПН. Так, для фторводородной космической ступени с СТКД в случае неравнотемпературного приемника при $\alpha = 0,1$ полезная масса может быть увеличена более чем на 50 % по сравнению с использованием разгонного блока типа КВРБ.

Показатели системы «концентратор–приемник»

Концентратор	Показатели системы КП	Приемник солнечного излучения		
		Р	Д	Н
Металлический	Параметр точности $\Delta\alpha$, град	0,47	0,47	0,59
	Угол статической ориентации, град	0,27	0,27	0,3
	Угол динамической ориентации, град	1,1	1,1	1,2
	Оптимальная температура приемника, К	2200	3200	3800
	Удельная масса концентратора, кг/м ²	2,7	2,7	2,4
Пленочный	Параметр точности $\Delta\alpha$, град	0,48	0,53	0,86
	Угол статической ориентации, град	0,27	0,28	0,37
	Угол динамической ориентации, град	1,1	1,1	1,5
	Оптимальная температура приемника, К	2400	3400	3800
	Удельная масса концентратора, кг/м ²	1,2	1,1	0,5

Примечание. Р, Д, Н – соответственно равнотемпературный, двухступенчатый, предельно-неравнотемпературный приемник солнечного излучения [2; 3].

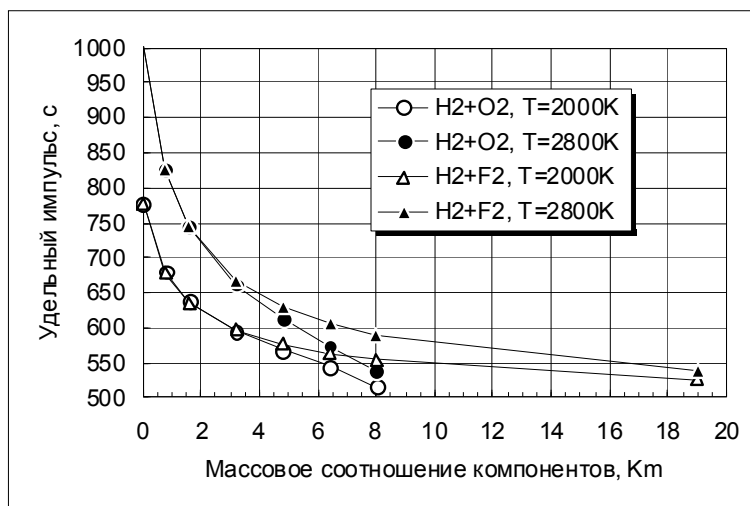


Рис. 1. Сравнительные зависимости теоретического удельного импульса от массового соотношения компонентов кислородно-водородного и фторводородного топлива для разных температур нагрева водорода при степени падения давления 10^4 ; давление в камере 0,2 МПа

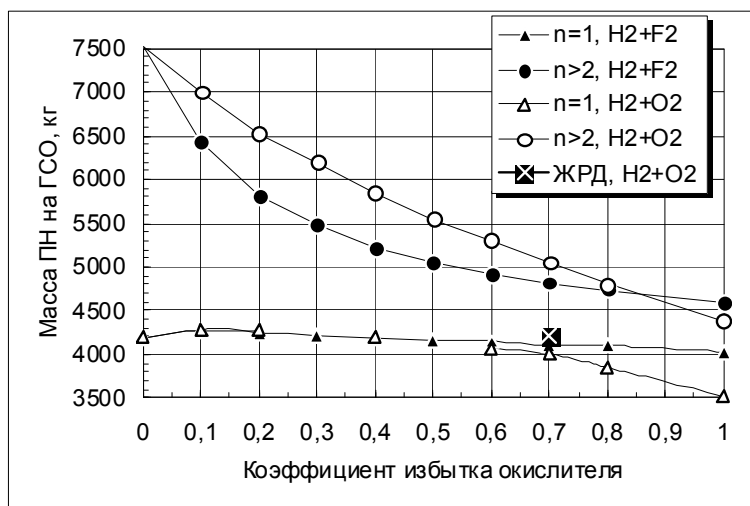


Рис. 2. Зависимость выводимой массы ПН на ГСО от коэффициента избытка окислителя при использовании СТРКД на компонентах H_2+O_2 и H_2+F_2 с одноступенчатым (число ступеней нагрева $n = 1$) и предельно-неравномерным ($n > 2$) приемником; концентратор – металлический, складного типа

Использование легких надувных пленочных зеркал [9–12] повышает массовую эффективность космической ступени с фторводородным СТРКД и обеспечивает, по сравнению с разгонным блоком типа КВРБ, заметный выигрыш в массе ПН – более 25 % при $\alpha = 0,1$ ($K_m = 0–0,19$) в случае одноступенчатого (равнотемпературного) приемника. При таком приемнике целесообразны небольшие величины $\alpha < 0,15$ (рис. 3). Использование предельно-неравномерного приемника с неоднородным нагревом водорода позволяет увеличить массовую эффективность двигателя и существенно расширить диапазон значений α , при которых сохраняется устойчивый выигрыш в массе ПН. Так, при $\alpha = 0,1$ выигрыш в массе ПН по сравнению с использованием разгонного блока КВРБ составляет около 70 %.

Для кислородно-водородного СТРКД, с позиций наибольшей массовой эффективности, в случае равнотемпературного приемника целесообразны величины $\alpha = 0–0,15$ ($K_m = 0–1,2$). Этот диапазон может быть существенно расширен в случае неравномерного нагрева.

В случае пленочного концентратора следует учитывать процессы деформации зеркала после приложения к нему нагрузки в процессе включения двигателя, а также время возвращения профиля концентратора к параболической форме. Эти вопросы требуют дополнительного изучения. Одним из возможных способов решения этих проблем может быть использование отверждаемой в космических условиях поверхности концентратора после его формирования на опорной орбите [9; 10; 18].

Оценим изменение размеров концентратора при дожигании. Графики на рис. 4, 5 показывают заметно меньшие размеры параболоидного концентратора в случае фторводородного СТРКД по сравнению с кислородно-водородным. Разница может составлять свыше 25 %. Можно отметить, что большие размеры легкого пленочного концентратора, по сравнению с металлическим, объясняются меньшей оптимальной точностью пленочного зеркала, особенно при ступенчатом приемнике. Большая площадь концентратора, в случае ступенчатого приемника, обусловлена его более высокой оптимальной температурой и меньшей требуемой точностью зеркала по сравнению с равнотемпературной системой КП. Если выбрать температуру ступенчатого приемника не как оптимальную, по критерию наибольшей массы ПН, а несколько меньшую (например, соответствующую случаю равнотемпературного приемника), то требуемый размер

концентратора и его точность окажутся существенно ниже; массовая эффективность СТРКД с такой системой КП будет превышать (конечно, в меньшей степени) эффективность двигателя с приемником равнотемпературного типа.

Так как при дожигании водорода снижается не только размер зеркала, но и масса ПН, то выбор целесообразных значений коэффициента избытка окислителя может быть осуществлен путем оценки степени снижения одного критерия (относительного изменения диаметра концентратора ΔD_k) при допустимом снижении другого (относительного изменения массы ПН $\Delta M_{пн}$). На рис. 6 и 7 представлены значения $\Delta M_{пн}$ и ΔD_k , приведенные к одинаковым величинам α (сравниваются компоненты кислород-водород и фтор-водород) для различных типов приемника применительно к легкому и тяжелому концентраторам.

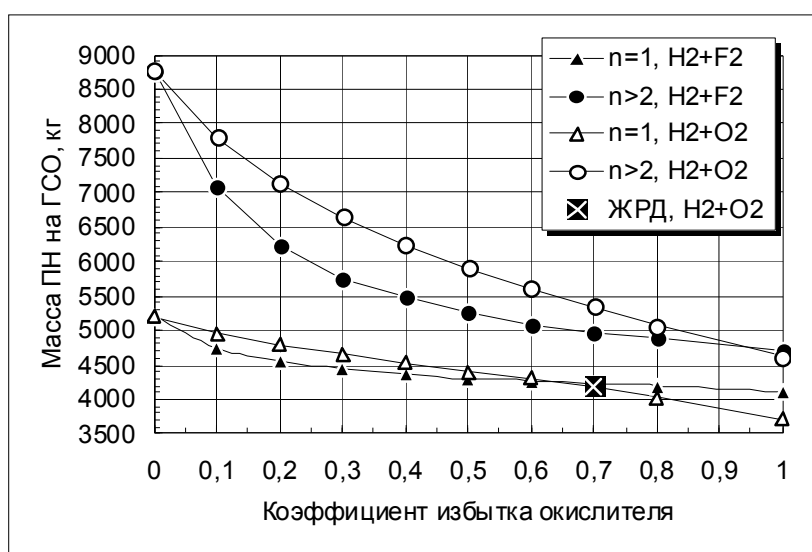


Рис. 3. Зависимость массы ПН от коэффициента избытка окислителя в случае пленочного концентратора

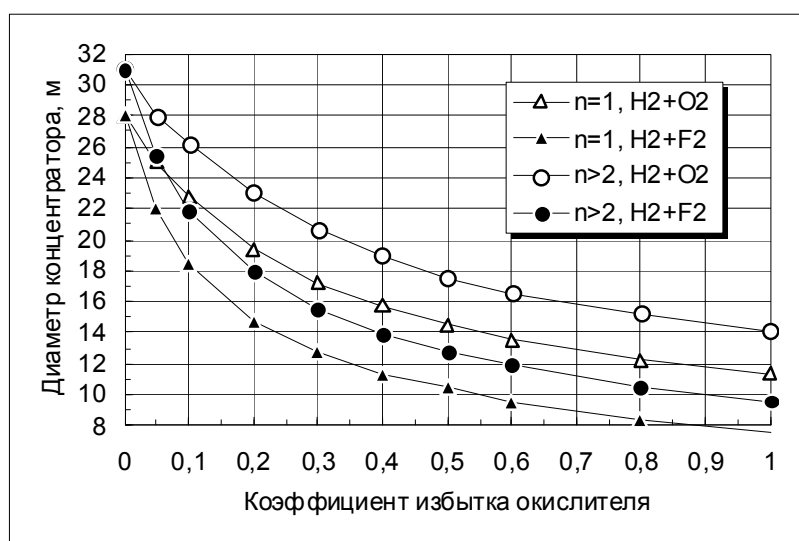


Рис. 4. Зависимость диаметра параболоидного концентратора от коэффициента избытка окислителя для разных типов приемника; концентратор – металлический, складного типа

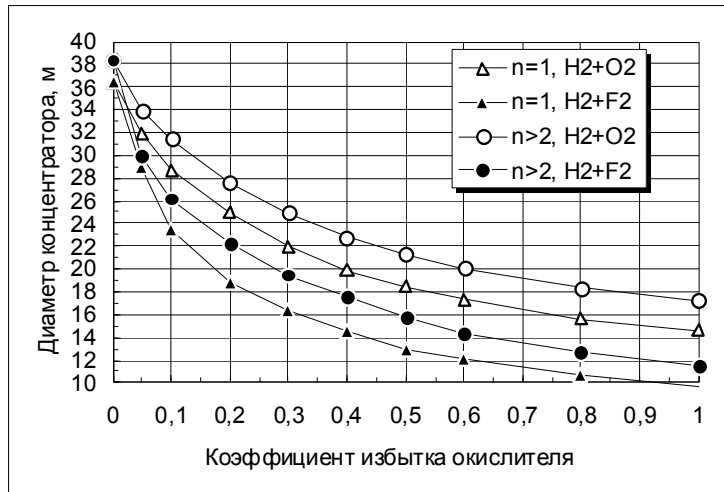


Рис. 5. Зависимость диаметра параболического концентратора пленочного типа от коэффициента избытка окислителя для разных типов приемника

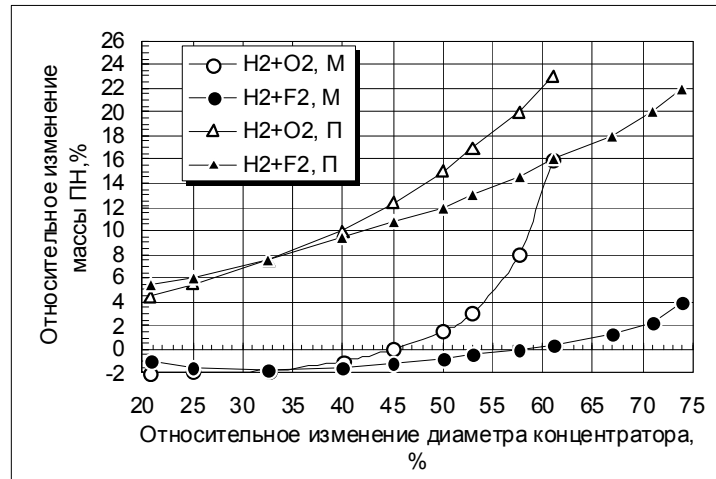


Рис. 6. Относительное изменение массы ПН и диаметра концентратора при дожигании нагретого водорода кислородом и фтором в случае металлического (М) и пленочного (П) концентратора; приемник – равнотемпературный

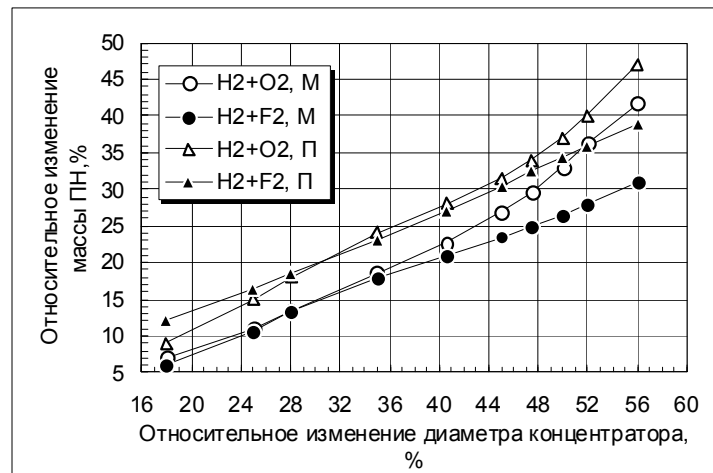


Рис. 7. Относительное изменение массы ПН и диаметра концентратора при дожигании нагретого водорода кислородом и фтором в случае металлического (М) и пленочного (П) концентратора; приемник – предельно-неравнотемпературный

В случае металлического (тяжелого) концентратора и равнотемпературного приемника в диапазоне $\alpha = 0,1-0,2$ возможен некоторый рост массы ПН за счет опережающего снижения массы зеркала по сравнению с падением экономичности двигателя при дожигании. При этом дожигание более выгодно при использовании фтора: размер зеркала может быть снижен приблизительно вдвое при прежней массовой эффективности. При увеличении α масса ПН в случае фтора снижается в меньшей степени по сравнению с кислородно-водородным СТРКД, при использовании которого наблюдается существенно нелинейное падение $M_{\text{пн}}$.

При пленочном концентраторе линейное соотношение $\Delta M_{\text{пн}}$ и $\Delta D_{\text{к}}$ нарушается при $\alpha > 0,4$, когда в большей мере начинает проявляться нелинейность изменения массы ПН в случае кислородно-водородного СТРКД.

При использовании неравнотемпературного приемника соотношения $\Delta M_{\text{пн}}$ и $\Delta D_{\text{к}}$ подобны при легком и тяжелом концентраторах и являются практически линейными в широком диапазоне α . Меньшее снижение массы ПН при одинаковом сокращении размеров зеркала в случае металлического концентратора также объясняется его большей долей в общей массе системы СТРКД-КА. По сравнению с равнотемпературным приемником снижение $M_{\text{пн}}$ здесь более сильное, что, однако, компенсируется более высокой начальной массовой эффективностью СТРКД со ступенчатой системой КП.

Заканчивая рассмотрение возможности использования фтора как окислителя в СТРКД, необходимо отметить его чрезмерно высокую химическую активность. Тем не менее опыт НПО «Энергомаш» наглядно свидетельствует о практической возможности создания двигателя с этим компонентом (ЖРД РД-301). Рассматривая фторводородный СТРКД с позиций экологической безопасности, необходимо учитывать, что он предназначен для работы в космических условиях и в штатной ситуации не загрязняет приземную атмосферу. Учитывая небольшую долю фтора в солнечном разгонном блоке по сравнению с общей массой топлива РН серии «Протон», содержащего такой широко используемый и экологически опасный компонент, как НДМГ, предельно допустимая концентрация которого в воздухе соизмерима с фтором, представляется целесообразным продолжение изучения вопроса о возможности использования фтора как окислителя в СТРКД.

Использование перекиси водорода в качестве окислителя в СТРКД. Рассмотрим возможность использования в СТРКД в качестве окислителя более экологичной перекиси водорода. Зависимости идеального удельного импульса топлива $H_2+H_2O_2$ от K_m при разных температурах нагрева водорода представлены на рис. 8. Сравнение рис. 1 и 8 показывает более высокую энергетику топлива в случае криогенных окислителей (O_2 и F_2). Тем не менее использование H_2O_2 в ряде случаев представляется целесообразным. В частности, когда снижение размеров концентратора и возможность длительного хранения одного из компонентов представляет приоритетную задачу при

некотором допустимом снижении массовой эффективности СТРКД (которая должна быть выше по сравнению с базовым кислородно-водородным ЖРД).

Проведенный оценочный расчет показывает меньшую массовую эффективность использования СТРКД с топливом $H_2+H_2O_2$ по сравнению с использованием фтора или кислорода (рис. 9), причем область α , при которой сохраняется выигрыш СТРКД с перекисью водорода над ЖРД, зависит от типа системы КП. Так, при использовании легкого пленочного зеркала рациональный диапазон коэффициента избытка окислителя составляет $\alpha < 0,1$ для равнотемпературного приемника и $\alpha < 0,6$ для ступенчатого. При использовании тяжелого металлического концентратора такой СТРКД может конкурировать с ЖРД только при неравнотемпературном приемнике и небольших значениях α .

Размеры концентратора в случае топлива $H_2+H_2O_2$ могут быть меньшими по сравнению с кислородно-водородным СТРКД: при небольших $\alpha = 0,1-0,2$ снижение диаметра зеркального параболоида не превосходит 5–7 % (рис. 10). При высоких α снижение диаметра концентратора может достигать 10–12 %. При этом, однако, массовая эффективность двигателя, использующего перекись водорода, оказывается меньше, чем в случае ЖРД.

Таким образом, использование перекиси водорода менее перспективно с позиций улучшения массогабаритных характеристик СТРКД по сравнению с фтором. Тем не менее в отдельных случаях (при малых α и приемнике ступенчатого типа) рассмотрение возможности использования этого компонента может оказаться целесообразным с позиций экологической безопасности двигателя и некоторого дополнительного снижения размеров солнечного концентратора по сравнению с использованием кислорода.

Заключение. Учитывая, что требования к системе КП СТРКД являются достаточно жесткими в части ее создания и функционирования, на начальных этапах разработки целесообразно ее упрощение (как наименее отработанной части двигателя) ценой некоторого снижения массовой эффективности использования СТРКД в составе КА. Одним из путей такого упрощения является уменьшение требуемой площади солнечного концентратора при дожигании рабочего тела.

Использование топлив с большим стехиометрическим соотношением компонентов (в частности, H_2+F_2 и $H_2+H_2O_2$) позволяет при данной тяге снизить расход нагреваемого в системе КП водорода и этим значительно уменьшить требуемый размер и массу солнечного концентратора. Кроме этого, повышенная плотность топлива с этими окислителями по сравнению с компонентами H_2+O_2 облегчает задачу выведения на орбиту.

Исследования возможности использования фтора в космической солнечно-термической ступени должны опираться на опыт разработок НПО «Энергомаш», имеющего безусловный приоритет в части практических разработок изделий, использующих этот компонент.

Важным является выбор целесообразного значения коэффициента избытка окислителя, при котором значительно уменьшаются размеры концентратора при допустимом снижении массовой эффективности. При этом необходимо учитывать степень неравномерности приемника солнечного излучения и тип зеркального концентратора.

Энергомассовая эффективность СТРКД с рассмотренными окислителями в ряде задач может быть увеличена, и в частности, по сравнению с ЖРД. Так, полезная масса, выводимая на ГСО, в случае фтор-

водородного СТРКД может быть увеличена более чем на 70 % по сравнению с использованием кислородно-водородного разгонного блока КВРБ. Требуемая площадь концентратора в случае использования фтора может быть значительно – на 25 % и более – снижена по сравнению с кислородно-водородным СТРКД. Использование перекиси водорода в некоторых задачах позволяет на 10–12 % снизить площадь концентратора по сравнению с кислородно-водородным СТРКД.

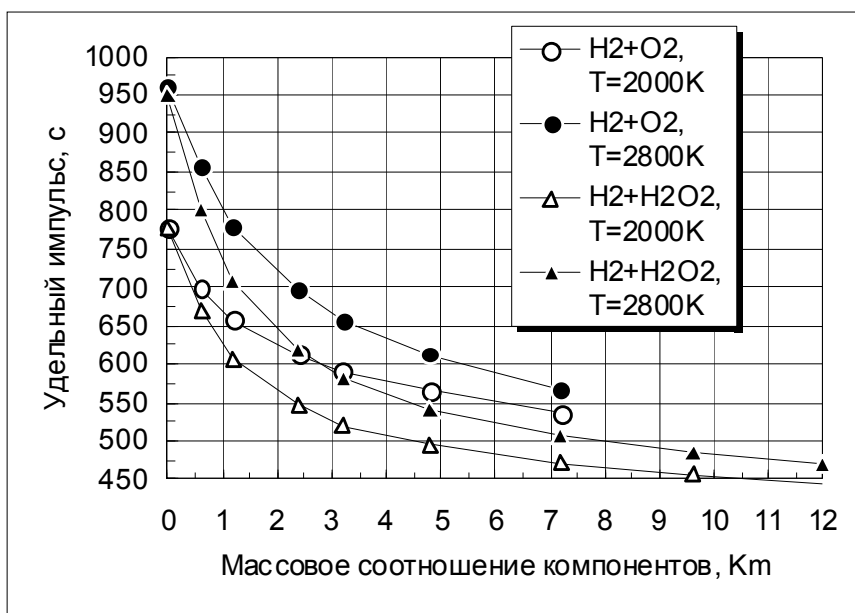


Рис. 8. Сравнительные зависимости теоретического удельного импульса от массового соотношения компонентов для топлива H₂+O₂ и H₂+H₂O₂ при разных температурах нагрева водорода; давление в камере 0,2 МПа, степень падения давления 10⁴

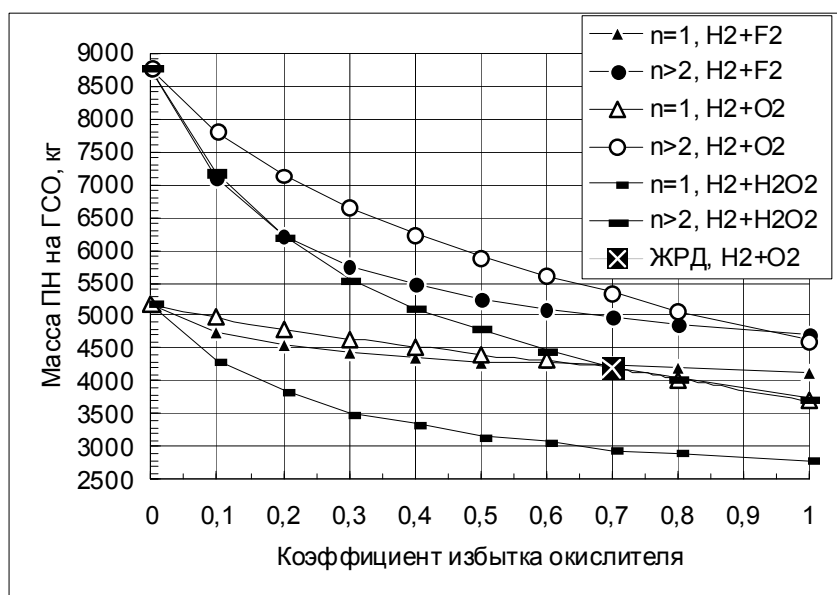


Рис. 9. Зависимость массы ПН от коэффициента избытка окислителя в случае пленочного надувного концентратора при использовании H₂O₂ и других окислителей для дожигания водорода

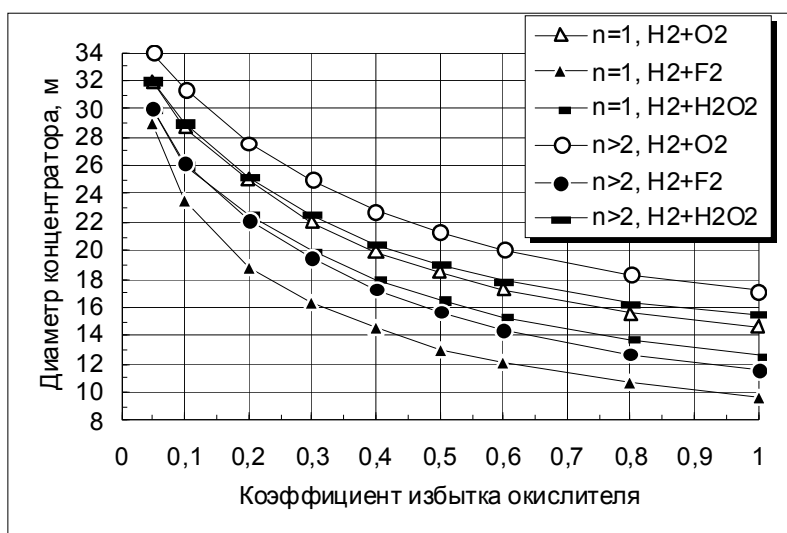


Рис. 10. Зависимость диаметра параболического концентратора пленочного типа от коэффициента избытка окислителя при использовании H_2O_2 и других окислителей для дожигания водорода

Библиографические ссылки

1. Кудрин О. И. Космические двигатели, использующие солнечную энергию. М.: МАИ, 1967. 270 с.
2. Кудрин О. И. Солнечные высокотемпературные космические энергодвигательные установки. М.: Машиностроение, 1987. 247 с.
3. Кудрин О. И., Финогенов С. Л. Солнечный ракетный двигатель со ступенчатой системой «приемник – тепловой аккумулятор» // Полет. 2000. № 6. С. 37–41.
4. Солнечная энергодвигательная установка с электронагревным тепловым аккумулятором и дожиганием рабочего тела / В. Н. Акимов [и др.] // Полет. 1999. № 2. С. 20–28.
5. Коротеев А. С. Концепция солнечной энергодвигательной установки с электронагревным тепловым аккумулятором и дожиганием рабочего тела // Вестник МАИ. 2000. Т. 7, № 1. С. 60–67.
6. Solar Power-Propulsion System with Electrically-Heated Heat Accumulator and Propellant Afterburning / A. S. Koroteev [et al.] // IAF Paper. 1999. № 99. P. 6.07.
7. Kick Stages with Solar Heat Propulsion Systems for Increase of Middle Class Soyuz Launchers Competitiveness / V. I. Pushkin [et al.] // 6th International Symposium on Propulsion for Space Transportation: Propulsion for Space Transportation of the XXIst Century (May 14–16, 2002). Paper № S36.2. Versailles, France.
8. Протасов Ю. С. Об исследованиях и разработках космических солнечных тепловых двигателей малой тяги. Современное состояние и перспективы // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: тезисы докладов XI Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. / МГТУ им. Н. Э. Баумана (15–17 нояб. 2000, г. Москва). М.: Изд-во ГПНТБ, 2000. С. 106.
9. Emrich W. J. Jr. Design Considerations for Space Transfer Vehicles Using Solar Thermal Propulsion // AIAA Paper. 1995. № 95–2634.
10. Frye P. E., Kennedy F. G. Reusable Orbital Transfer Vehicles (ROTV) Applications of an Integrated

Solar Upper Stage (ISUS) // AIAA Paper. 1997. № 97–2981.

11. Hawk C. W., Adams A. M. Conceptual Design of a Solar Thermal Upper Stage (STUS) Flight Experiment // AIAA Paper. 1995. № 95–2842.
12. McClanahan J. A., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion Transfer Stage Design for Near-Term Science Mission Applications // AIAA Paper. 1994. № 94–2999.
13. Shoji J. M., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion for Orbit Transfer // AIAA Paper. 1988. № 3171.
14. Fiott D., Estublier D. Solar Thermal Propulsion // 6th International Symposium on Propulsion for Space Transportation: Propulsion for Space Transportation of the XXIst Century (May 14–16, 2002). Paper № S36.1. Versailles, France.
15. Kanda Takeshi, Wakamatsu Yoshio, Kanmuri Akio. LH2-LOX LRE with Solar Heater // Tech. Rept. Aerosp. Lab. 1988. № 992. P. 1–13.
16. Kudrin O. I., Finogenov S. L., Nickolenko V. V. Solar Thermal Rocket Engine with Post-Burning: the Possibility of Its Usage in Space // Space Technology. 1996. Vol. 16, No. 1. Pp. 15–19.
17. Стенд динамического слежения за Солнцем и его характеристики / О. И. Кудрин [и др.] // Доклады Всесоюз. конф. по использованию солнечной энергии (17–21 июня 1969 г.). Секция С-3.
18. Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полуэктов В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 248 с.

References

1. Kudrin O. I. *Kosmicheskie dvigateli, ispol'zuyushchie solnechnuyu energiyu*. [Space engines using solar energy]. Moscow, MAI Publ., 1967, 270 p.
2. Kudrin O. I. *Solnechnye vysokotemperaturnye kosmicheskie energodvigatel'nye ustanovki*. [Solar high-temperature space power plants]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987, 247 p.

3. Kudrin O. I., Finogenov S. L. [Solar thermal propulsion with staged system "absorber-thermal storage"]. *Polet*, 2000, No. 6, P. 37–41 (In Russ.).
4. Akimov V. N., Arhangel'skiy N. I., Koroteev A. S., Kyz'min E. P. [Solar power propulsion plant with electrically-heated thermal storage and working medium afterburning]. *Polet*, 1999, No. 2, P. 20–28 (In Russ.).
5. Koroteev A. S. [Conception of solar power propulsion plant with electrically-heated thermal storage and working medium afterburning]. *Vestnik MAI*. 2000, Vol. 7, No. 1, P. 60–67 (In Russ.).
6. Koroteev A. S., Arkhangelsky N. I., Akimov V. N., Kuz'min E. P. Solar Power-Propulsion System with Electrically-Heated Heat Accumulator and Propellant Afterburning. IAF Paper 1999, No. 99-S.6.07.
7. Pushkin V. I., Chechin A. V., Fomin G. E., Gurtov A. S., Filatov A. N., Koroteev A. S., Popov S. A., Akimov V. N., Arkhangelski N. I. Kick Stages with Solar Heat Propulsion Systems for Increase of Middle Class Soyuz Launchers Competitiveness. *6th International Symposium on Propulsion for Space Transportation: Propulsion for Space Transportation of the XXIst Century*. Paper no. S36.2. May 14–16, 2002. Versailles, France.
8. Protasov Yu. S. [About research and design of space solar thermal propulsion of low thrust. State-of-the-art condition and perspectives] *Tezisy dokladov XI Vsesoyuzskoy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Gazoturbinnye i kombinirovannye ustanovki i dvigateli"* [Proc. XI Russian mezhvuzovskoy science technical conference "Gas-Turbine Power Plants and Engines"]. Moscow, MGTU named after N. Ye. Bauman, 15–17 November 2000, Moscow, GPNTB Publ., 2000, P. 106 (In Russ.).
9. Emrich W. J. Jr. Design Considerations for Space Transfer Vehicles Using Solar Thermal Propulsion. AIAA Paper 1995, No. 95-2634.
10. Frye P. E., Kennedy F. G. Reusable Orbital Transfer Vehicles (ROTV) Applications of an Integrated Solar Upper Stage (ISUS). AIAA Paper 1997, No. 97-2981.
11. Hawk C. W., Adams A. M. Conceptual Design of a Solar Thermal Upper Stage (STUS) Flight Experiment. AIAA Paper 1995, No. 95-2842.
12. McClanahan J. A., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion Transfer Stage Design for Near-Term Science Mission Applications. AIAA Paper 1994, No. 94-2999.
13. Shoji J. M., Frye P. E. Solar Thermal Propulsion for Orbit Transfer. AIAA Paper 1988, No. 3171.
14. Fiot D., Estublier D. Solar Thermal Propulsion. *6th International Symposium on Propulsion for Space Transportation: Propulsion for Space Transportation of the XXI Century*. Paper no. S36.1. May 14–16, 2002. Versailles, France.
15. Kanda Takeshi, Wakamatsu Yoshio, Kanmuri Akio. LH2-LOX LRE with Solar Heater. *Tech. Rept. Aerosp. Lab.* 1988, No. 992, P. 1–13.
16. Kudrin O. I., Finogenov S. L., Nickolenko V. V. Solar Thermal Rocket Engine with Post-Burning: the Possibility of Its Usage in Space. *Space Technology*. 1996, Vol. 16, No. 1, P. 15–19.
17. Kudrin O. I., Polujektov V. P., Kochetov V. K., Vasil'ev Yu. B. Stand for dynamic tracking to the Sun and its characteristics [Stend dinamicheskogo slezheniya za Solncem i ego harakteristiki]. *Doklady Vsesoyuznoy konferentsii po ispol'zovaniyu solnechnoy energii* [Reports of the USSR Conference on Solar Energy Use]. 17–21 July 1969. Sekciya S-3 (In Russ.).
18. Grilihes V. A., Matveev V. M., Poluehktov V. P. *Solnechnye vysokotemperaturnye istochniki tepla dlya kosmicheskikh apparatov* [Solar high-temperature heat sources for space vehicles]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975, 248 p.

© Финогенов С. Л., Коломенцев А. И.,
Кудрин О. И., 2015

**МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОЛНОВОДА
С ТОКОПРОВОДЯЩИМ ВАКУУМНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

И. И. Хоменко, Д. В. Раводина, А. Е. Михеев*, Т. Т. Ереско, С. П. Ереско

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: michla@mail.ru

Предложен способ изготовления волноводов и волноводных элементов гальванопластическим методом с нанесением токопроводящего вакуумного покрытия, удовлетворяющий техническим требованиям, выдвигаемым к волноводным элементам: минимальный коэффициент стоячей волны по напряжению – 1,03–1,05; минимальные потери энергии при прохождении волны – не более $5 \cdot 10^{-2}$ дБ; электрогерметичность фланцевых изделий – до 40–50 дБ. Также предъявляются требования по шероховатости внутренней поверхности канала (R_a не более 0,2 мкм) и отклонению от номинального размера в пределах $\pm 0,01$ мм. В работе использован способ изготовления волноводов миллиметрового диапазона, включающий изготовление оправки из алюминиевого сплава, наружная поверхность которой повторяет форму внутреннего канала волновода, нанесение на оправку металлических слоев для формирования токопроводящего покрытия внутреннего канала и корпуса волновода и дальнейшее вытравливание оправки. Исследована микроструктура корпуса волноводного тракта, проведены исследования на адгезионную прочность серебряного покрытия с корпусом волновода и измерена шероховатость волноводного тракта. Проведены исследования внутренней поверхности волноводного тракта на наличие различных включений. Отработана технология нанесения вакуумного покрытия на оправку и наращивания медного корпуса волноводного тракта с последующим вытравливанием оправки. Таким способом можно изготавливать волноводы и элементы волноводных трактов сложного сечения. Токопроводящие покрытия, нанесенные вакуумным способом, получают плотными и однородными, не происходит наводораживания, и исключается химическое загрязнение покрытий, что приводит к снижению потери энергии при прохождении волны и повышению качества передаваемого сигнала. Данным способом был изготовлен волновод круглого сечения диаметром 10 мм и длиной 120 мм, который имеет высокую адгезию электропроводящего покрытия с корпусом волновода.

Ключевые слова: волноводы, вакуумное нанесение покрытий, гальванопластика.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 690–694**METHOD OF WAVEGUIDES
WITH CONDUCTIVE VACUUM COATING FABRICATION**

I. I. Khomenko, D. V. Ravodina, A. E. Mikhhev*, T. T. Eresko, S. P. Eresko

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: michla@mail.ru

Presented is the way of fabrication of waveguides and waveguide elements using the electroformed method of applying conductive vacuum coating that meets the technical requirements imposed on the waveguide elements: the minimum ratio of a standing wave voltage (VSWR) – 1,03–1,05; minimal loss of energy during the passage of the wave is not more than $5 \cdot 10^{-2}$ dB; electrokinetically flange products – up to 40–50 dB. Also the demands on the roughness of the inner surface of the channel (R_a is not more than 0.2 μ m) and the deviation from the nominal size in the range of $\pm 0,01$ mm. The paper uses the method of manufacturing of a waveguide millimeter range, including the manufacture of the mandrel of aluminum alloy, the outer surface of which follows the shape of the internal channel of the waveguide, causing the mandrel which is a metal layer for forming conductive coating of the inner channel and the body of the waveguide, and further etching the mandrel. Investigated are the microstructure of the waveguide housing tract, the adhesion of the silver coating to the body of the waveguide and the measured roughness of the waveguide path are. Studies of the inner surface of the waveguide path in the presence of various impurities are made. The technology of vacuum deposition of the coating on the mandrel and capacity copper waveguide housing tract with subsequent etching of the mandrel has been developed. In this way it is possible to make the waveguides and waveguide elements tracts complex cross-sections. The conductive coatings, deposited by vacuum method, becomes dense and homogeneous,

no absorption, and prevents chemical contamination of the coatings, resulting in reduced energy loss when passing waves and improves the quality of the transmitted signal. This method was made a waveguide of circular cross section with a diameter of 10 mm and length of 120 mm which has high adhesion with a conductive coating to the body of the waveguide.

Keywords: waveguides, vacuum plating, electrotyping.

Введение. Волноводы широко применяются в современной технике. Одной из наиболее развивающихся областей радиоэлектроники является изготовление антенн и устройств СВЧ. Уровень развития этой области во многом определяет состояние телекоммуникационных систем, радиолокации, навигации, телеметрии, радиоастрономии. Современные достижения в производстве антенн и СВЧ-устройств базируются на последних разработках электроники, полупроводниковой техники, технической кибернетики, когерентной радиооптики и т. д. Новые характеристики радиоэлектронных систем достигаются благодаря органическому слиянию передающе-приемных антенн и систем пространственно-временной обработки сигналов. Увеличение числа одновременно работающих радиосистем приводит к насыщенности окружающего пространства радиосигналами, что вызывает необходимость электромагнитной совместимости этих систем. Для решения этого вопроса создаются антенные системы, способные адаптироваться в окружающей обстановке. Различные объекты, например летательные аппараты, имеют десятки антенн разных диапазонов и назначений, и обеспечение их электромагнитной совместимости во многом зависит от характеристик антенн и СВЧ-устройств.

Волноводы, входящие в антенно-фидерные устройства, служат направляющими системами для передачи энергии от передатчика в передающую антенну и от приемной антенны к радиоприемнику в радиолокационных космических и других станциях и представляют собой каналы с частотно-зависимыми характеристиками. Основным преимуществом металлических волноводов по сравнению с двухпроводной симметричной и коаксиальной линиями являются малые потери на СВЧ. Это обусловлено практическим отсутствием излучения энергии в окружающую среду и малыми тепловыми потерями энергии [1–16].

К волноводным элементам предъявляются следующие технические требования: минимальный коэффициент стоящей волны по напряжению (КСВН) – 1,03–1,05; минимальные потери энергии при прохождении волны – не более $5 \cdot 10^{-2}$ дБ; электрогерметичность фланцевых изделий – до 40–50 дБ; шероховатость канала волноводной трубки прямоугольного сечения на калиброванном участке Ra – не более 0,2 мкм и отклонение от номинального размера – в пределах $\pm 0,01$ мм [11; 12; 17; 18].

При изготовлении волноводов используются методы порошковой металлургии, точного литья, формообразования с использованием низкотемпературной плазмы, обработки давлением металлов (деформирование заготовки, многостороннее деформирование, холодное выдавливание, гибка), высокотемпературная пайка, различные виды сварки (аргонодуговая, диффузионная, электронно-лучевая, микроплазменная,

лазерная), электроэрозионная и электрохимическая обработка, а также гальванопластические методы.

Все вышеперечисленные методы заключаются в том, что вначале изготавливают сам волновод, а затем приступают к обработке внутреннего канала и нанесению на его поверхность гальваническим методом токопроводящего покрытия из серебра, золота или платины. Однако небольшие по размеру и сложные по конфигурации каналы обработать равномерно практически невозможно, отсюда вытекает их основной недостаток – несоответствие параметров проводящих характеристик волноводов необходимым требованиям [11; 19–21].

Существует способ изготовления гибких металлических волноводов, основанный на применении электрохимических методов наращивания металлических пленок на оправку с последующим удалением этой оправки вытравливанием [13; 22]. Для получения необходимой формы и механических качеств волновода на оправку, изготовленную из алюминиевого сплава, гальванически осаждают пленки цинка толщиной 1–2 мкм, меди – 2–3 мкм, серебра – 25–30 мкм и вновь меди – 100–150 мкм, затем просушивают. После этого к оправке припаивают фланцы, изделие обезжиривают, декапируют, наносят слой латуни толщиной 5–10 мкм и снова просушивают. Затем обматывают гибкий волновод полосами из сырой резины, вулканизируют резиновый слой, а затем вытравливают оправку. После чего выполняют обычную подготовку под покрытие и наносят гальваническим методом на внутреннюю поверхность волновода слой серебра толщиной 15 мкм.

Недостатком этого способа является пористость внутреннего токопроводящего слоя волновода, присущая покрытиям, нанесенным гальваническим методом. При гальваническом покрытии возможно насыщение покрытия водородом, что ведет к ухудшению плотности покрытия и снижению его адгезионной прочности.

Кроме того, токопроводящий слой загрязнен химическими соединениями, сопровождающими гальванический процесс.

Для волновода СВЧ-диапазона необходимая величина токопроводящего слоя мала и достигает 3–6 мкм. Малая глубина токопроводящего слоя, в свою очередь, предъявляет высокие требования к структуре токопроводящего скин-слоя и его шероховатости.

Если неровности поверхностного слоя велики по сравнению с его глубиной, то при прохождении высокочастотных токов по такой развитой поверхности это приводит к увеличению электрических потерь на нагрев. При величине шероховатости, равной глубине поверхностного токопроводящего слоя, коэффициент затухания энергии электромагнитной волны возрастает в 1,6 раза [3; 11; 16].

Известно, что наличие адсорбционной воды и кислорода на поверхности волновода отрицательно влияет на прохождение СВЧ-сигнала. Наличие физически адсорбированных молекул и хемосорбированных атомов может привести к нестабильности параметров работы волноводов, что может проявиться в резком изменении теплового режима.

Экспериментальная часть. В работе использован способ изготовления волноводов миллиметрового диапазона, включающий изготовление оправки из алюминиевого сплава, наружная поверхность которой повторяет форму внутреннего канала волновода, имеет требуемые шероховатость поверхности и точность размеров, нанесение на оправку металлических слоев для формирования токопроводящего покрытия внутреннего канала и корпуса волновода и дальнейшее вытравливание оправки. На наружную поверхность анодированной оправки нанесли слой серебра вакуумным напылением. На полученный слой серебра гальванопластическим методом нанесли слой меди до достижения заданной толщины корпуса волновода.

Волновод с параметром шероховатости внутренней поверхности $Ra = 0,08$ мкм был изготовлен из алюминиевого сплава Д16, наружная поверхность которого повторяет форму внутреннего канала.

Для обеспечения требуемой шероховатости поверхности производили:

- 1) полирование на бязевых кругах с пастой ГОИ;
- 2) обезжиривание в уайт-спирите;
- 3) электрополировку в электролите, в состав которого входят:
 - фосфорная кислота – 1100–1300 г/л;
 - хромовый ангидрид – 130–180 г/л;
 - серная кислота – 100–150 г/л;

Режимы электрополировки: температура $t = 70\text{--}80$ °С, плотность тока – 10 А/дм², напряжение – 12 В; продолжительность – 5–10 мин при реверсе тока, или 3–5 мин без реверса тока;

4) промывку в водном растворе, содержащем калий бихромат – 10–15 г/л, соду кальцинированную (Na_2CO_3) – 15–20 г/л, при температуре 80 °С в течение 30–40 с;

5) анодирование в растворе кислоты 20 % H_2SO_4 при плотности тока 1 А/дм² и напряжении 12–18 В в течение 15–20 мин, с пропиткой в растворе жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$);

6) промывку в дистиллированной воде при температуре 25–30 °С;

7) сушку при 50–60 °С;

8) обезжиривание бензином БР-1(калоша).

При этом шероховатость наружной поверхности оправки обеспечивается равной требуемой, а именно, $Ra = 0,08$ мкм.

Затем проводили операцию вакуумной металлизации поверхности оправки, осуществляемую в два этапа:

– установка оправки в вакуумную камеру и предварительная обработка оправки в тлеющем разряде при остаточном давлении $1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. в течение 20–25 мин;

– при достижении давления в вакуумной камере $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. оправку нагревали до температуры 200–250 °С. По мере стабилизации давления вакуума

на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. начинали испарение серебра, при этом ток нагревателя равнялся 380–390 А, температура испарителя достигалась 1000–1100 °С, время испарения составляло 40–50 мин, толщина нанесенного электропроводящего слоя серебра достигалась 10 мкм.

Затем оправку остужали в среде вакуума до температуры 30–40 °С, после чего доставали оправку из камеры и взвешивали на аналитических весах.

Затем производили наращивание корпуса волновода гальванопластическим осаждением слоя меди на слой серебра до достижения требуемой толщины корпуса, осуществляя контроль промежуточным взвешиванием [23; 24].

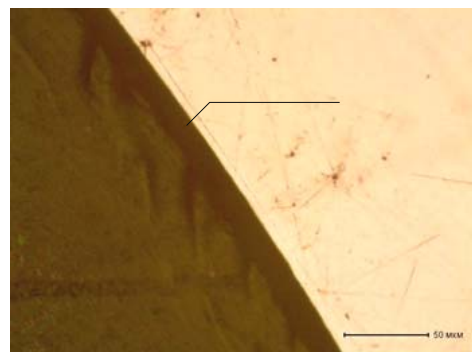
Для приготовления медного электролита использовали сульфат меди (медный купорос) – 150–180 г на 1 л воды при $t = 60\text{--}80$ °С. После охлаждения до температуры $t = 30\text{--}40$ °С электролит фильтровали и затем в него медленно, тонкой струей вливали серную кислоту, во избежание быстрого разогревания электролита и его разбрызгивания. Содержание серной кислоты поддерживали в пределах 35–40 г/л.

После наращивания корпуса волновода до требуемых размеров по толщине припаивали фланцы, производили взвешивание волновода с оправкой и осуществляли вытравливание оправки из алюминиевого сплава горячим раствором щелочи NaOH (300 г/л при температуре 90–100 °С) до полного ее растворения, контролируя процесс по времени растворения контрольного образца или контролируя массу волновода.

Затем промывали волновод (изделие) вначале в горячей воде при $t = 60\text{--}80$ °С, затем в холодной воде при температуре 20 °С.

В дальнейшем производили сушку волновода продувкой горячим воздухом при температуре $t = 50\text{--}70$ °С [25].

Изготовленный данным способом волновод круглого сечения диаметром 10 мм, длиной 120 мм имеет высокую адгезию электропроводящего покрытия с корпусом волновода. Структура полученного волновода представлена на рисунке. Адгезию определяли методом нанесения сетки 4–6 параллельных линий до основного металла на расстоянии 2–3 мм и 4–6 параллельных линий, перпендикулярных к ним, на образцах-свидетелях, отслоений не наблюдалось [13; 26]. Шероховатость электропроводящего покрытия составила $Ra = 0,08$ мкм, потери энергии при прохождении волны не превышают требуемые параметры.



Структура полученного волновода

Заключение. Представленная технология позволяет изготавливать волноводы и элементы волноводных трактов сложного сечения и наносить токопроводящие покрытия вакуумным способом [27–29]. Получаемые покрытия отличаются высокой плотностью и однородностью за счет исключения химических загрязнений и наводораживания. Данная технология получения волновода приводит к снижению потери энергии при прохождении волны и повышению качества передаваемого сигнала.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/к.

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, the state contract № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/к.

Библиографические ссылки

1. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский [и др.] ; под ред. Д. И. Воскресенского. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Радиотехника, 2006. 376 с. : ил.
2. Петров Б. Н. Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Радио и связь, 2000. 357 с.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 434 с.
4. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М. : Радио и связь, 1983. 150 с.
5. Радиоэлектронные устройства СВЧ / под ред. канд. техн. наук А. А. Кузьмина. Томск : Изд-во ТГУ, 1992. 193 с.
6. Сравнительный анализ способов формирования проводящего покрытия внутренней поверхности волновода малого сечения / Я. И. Бульбик [и др.] // Вестник СибГАУ. 2005. № 3. С. 201–205.
7. Седелецкий В. Б., Соколов В. Б., Лившиц И. И. Прямопередающая аппаратура спутниковой связи // Зарубежная радиоэлектроника. 1982. № 9. С. 70–94.
8. Соколов А. В. Достижения науки и техники в радиотехнических системах, антеннах и волноводах // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 2. С. 74–77.
9. Чернушенко А. М. Конструкции СВЧ-устройств и экранов. М. : Радио и связь, 1983. 184 с.
10. Радиоизмерительные и электронные системы в короткой части миллиметрового диапазона волн / Н. С. Акишин [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. 1999. № 5. С. 22–61.
11. Пат. 2441727 Российская Федерация, МПК В 21 D 35/00, Н 01 Р 11/00. Способ изготовления внутренних каналов, волноводных трактов от миллиметрового диапазона и устройства для его реализации / Обушников В. Я., Шешкин А., Гусаров И. А., Осипов В. И., Мельников В. А. ; патентообладатель Федеральный научно-производственный центр «Производственное объединение «Старт» имени М. В. Проценко». № 2010141254/02 ; заявл. 07.10.2010 ; опубл. 10.02.2012.
12. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкции СВЧ. Волноводы и волноводные устройства : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1974. 304 с.
13. Пат. 74153 СССР, Кл. 48b, 7. Способ изготовления гибких металлических волноводов методом электролиза / Алексеев А. А., Жердева Т. В. Опубл. 01.01.1949.
14. Бубнов Е. Я. Антенно-фидерные устройства СВЧ : курс лекций. В 2 ч. Ч. 2. Фидерные линии: двухпроводные линии и волноводы. Н. Новгород : ВГАВТ, 2009. 34 с.
15. Лялин К. С. Антенно-фидерные устройства : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. М. : МИЭТ, 2004. 79 с.
16. Лифшиц М. Ю. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : учеб. пособие. М. : МТУСИ, 2005. 74 с. : ил.
17. ГОСТ 8.249–77. Государственная система обеспечения единства измерений. Атенюаторы коаксиальные и волноводы измерительные. Методы и средства поверки в диапазоне частот от 100 кГц до 17,44 ГГц. Введ. 1978–07–01. М. : Изд-во стандартов, 1977. 13 с.
18. Пищин О. Н., Дмитриев В. Н. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах подвижной радиосвязи. Астрахань : Изд-во АГТУ, 2013. 243 с. : ил.
19. Пат. 2042739 Российская Федерация, МПК⁶ С 23 С 14/24. Способ вакуумного нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубчатого изделия / Сидоренко В. И., Штенников И. В., Макаров А. С. ; заявитель и патентообладатель Сидоренко В. И., Штенников И. В., Макаров А. С. № 5022904 ; заявл. 22.01.1992 ; опубл. 27.05.1995.
20. Пат. 1635235 СССР, Н 01 Р 11/00. Способ изготовления волноводов / Соколов Ю. Г., Шимичев Н. В., Новикова Е. В. № 4632047 ; заявл. 09.01.1989 ; опубл. 15.03.1991.
21. Чистюхин В. В. Антенно-фидерные устройства : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. М. : МИЭТ, 2005. 79 с.
22. Лубнин М. А., Трифанов И. В. Технология изготовления волноводов : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. / САА Красноярск, 1993. 154 с.
23. ОСТ-4.054.009–77. Устройства СВЧ. Волноводные линии. Детали и сборочные единицы изготовления методом гальванопластики. Введ. 1978–07–01. Изд-е офиц. 1978. 219 с.
24. ГОСТ 9.302–88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. Введ. 1990–01–01. М. : Изд-во стандартов, 2001. 38 с.
25. ОСТ 5.9941–84. Элементы СВЧ волноводные. Введ. 1986–01–01. Изд-е офиц. 1986. 30 с.
26. Климов А. И. Антенно-фидерные устройства : учеб. пособие. Воронеж : ВИ МВД России, 2012. 260 с. : ил.
27. Исследование состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 216–219.
28. Разработка технологии нанесения радиоотражающих покрытий / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 4(50). С. 222–226.
29. Оськин А. В., Хоменко И. И., Гирн А. В. Нанесение токопроводящего покрытия на внутреннюю поверхность волновода малого сечения // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. В 3 ч. Ч. 1. 2014. С. 27–29.

References

1. Voskresenskiy D. I. et al. *Ustroystva SVCh i anteny* [Microwave devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 376 p.
2. Petrov B. N. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and wave propagation]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000, 357 p.
3. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 434 p.
4. Markov G. T., Chaplin A. F. *Vozbuzhdenie elektromagnitnykh voln* [Excitation of electromagnetic waves]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983, 150 p.
5. *Radioelektronnye ustroystva SVCh* [Radio-electronic devices microwave]. Ed. A. A. Kuz'mina. Tomsk, Izd. TGU Publ., 1992, 193 p.
6. Bul'bik Ya. I., Eresko T. T., Tregubov S. I., Khomenko I. I. [The comparative analysis of ways of forming of the carrying-out covering of an internal surface of a wave guide of small section]. *Vestnik SibGAU*, 2005, No. 3, P. 201–205 (In Russ.).
7. Sedeletskiy V. B., Sokolov V. B., Livshits I. I. [Directly transmitting satellite communications equipment]. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1982, No. 9, P. 70–94 (In Russ.).
8. Sokolov A. V. [Advances in science and technology in radio systems, antennas and waveguides]. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 1997, No. 2, P. 74–77 (In Russ.).
9. Chernushenko A. M. *Konstruktsii SVCh-ustroystv i ekranov* [Design of microwave devices and screens]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983, 184 p.
10. Akishin N. S. et al. [Radio and electronic systems in a short part of the millimeter-wave]. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1999, No. 5, P. 22–61 (In Russ.).
11. Obushnikov V. Ya., Steshkin A., Gusarov I. A., Osipov V. I., Mel'nikov V. A. *Sposob izgotovleniya vnutrennikh kanalov, volnovodnykh traktov ot millimetrovogo diapazona i ustroystva dlya ego realizatsii* [A method of manufacturing inner channel, the waveguide paths from the millimeter range and device for its implementation]. Patent RF, no. 2441727, 2012.
12. Bushminskiy I. P. *Izgotovlenie elementov konstruktsii SVCh. Volnovody i volnovodnye ustroystva* [Production of structural elements of the microwave. Waveguides and waveguide devices a tutorial]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1974, 304 p.
13. Alekseev A. A., Zherdeva T. V. *Sposob izgotovleniya gibkikh metallicheskh volnovodov metodom elektroliza* [A method for manufacturing flexible metal waveguides by electrolysis]. Patent SSSR, no. 74153, 1949.
14. Bubnov E. Ya. *Antenno-fidernye ustroystva SVCh* [Antenna-feeder microwave devices]. A course in 2 hours. Part 2: The feed lines: two-wire lines and waveguides. Nizhniy Novgorod: VGAVT Publ., 2009, 34 p.
15. Lyalin K. S. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Part 1. Moscow, MIET Publ., 2004, 79 p.
16. Lifshits M. Yu. *Antenno-fidernye ustroystva i rasprostranenie radiovoln* [Antenna-feeder devices and Propagation]. Textbook. Moscow, MTUSI, 2005, 74 p.
17. GOST 8.249–77. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Attenyuatory koaksial'nye i volnovodnye izmeritel'nye. Metody i sredstva poverki v diapazone chastot ot 100kGts do 17,44 GGts*. [State Standard 8.249-77 17. State system for ensuring the uniformity of measurements. Attenuators, coaxial and waveguide measurement. Methods and means of verification in the frequency range from 100 kHz to 17.44 GHz]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 13 p.
18. Pishchin O. N. *Rasprostranenie radiovoln i antenno-fidernye ustroystva v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi* [Propagation and antenna-feeder devices in mobile radio communication systems]. Astrakhan', AGTU Publ., 2013, 243 p.
19. Sidorenko V. I., Shtennikov I. V., Makarov A. S. *Sposob vakuumnogo nanesheniya pokrytiya na vnutrennyuyu poverkhnost' trubchatogo izdeliya* [The vacuum coating on the inner surface of the tubular article]. Patent RF, no. 2042739, 1995.
20. Sokolov Yu. G., Shimichev N. V., Novikova E. V. *Sposob izgotovleniya volnovodov* [A method for manufacturing waveguides]. Patent SSSR, no. 1635235, 1991.
21. Chistyukhin V. V. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Part 2. Moscow, MIET Publ., 2005, 79 p.
22. Lubnin M. A., Trifanov I. V. *Tekhnologiya izgotovleniya volnovodov* [Manufacturing technology waveguides]. Part 1. Krasnoyarsk, SAA Publ., 1993, 154 p.
23. OST-4.054.009–77. *Ustroystva SVCh. Volnovodnye linii. Detali i sborochnye edinitsy izgotovleniya metodom gal'vanoplastiki* [OST-4.054.009.-77. Microwave devices. Waveguide line. Parts and assembly units manufacturing electroformed]. Official Publ., 1978, 219 p.
24. GOST 9.302–88 *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody kontrolya* [State Standard 9.302-88 24. Unified system of corrosion and aging. Metallic and non-metallic mineral. Control methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2001, 38 p.
25. OST 5.9941–84 *Elementy SVCh volnovodnye* [OST 5.9941-84 microwave waveguide elements]. Izdanie ofitsial'noe Publ., 1986, 30 p.
26. Klimov A. I. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Voronezh, VI MVD Rossii Publ., 2012, 260 p.
27. Mikheev A. E., Kharlamov V. A., Kryuchek S. D., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [Study of composition of residual and plasma forming gases in the vacuum coaters]. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), p. 216–219. (In Russ.).
28. Mikheev A. E., Girn A. V., Kharlamov V. A., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [The development of the coatings technology application radioreflexive coatings]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 4(50), P. 222–226 (In Russ.).
29. Os'kin A. V., Khomenko I. I., Girn A. V. [Electrocoating deposition on the inner surface of light section waveguide]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVIII Intern. scientific. Conf. "Reshetnev Readings"]. Part 1. Krasnoyarsk, 2014, P. 27–29 (In Russ.).

РАЗДЕЛ
PART
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL
PROCESSES
AND MATERIALS



МАГНИТОЕМКОСТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$

С. С. Аплеснин, А. М. Харьков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: khark.anton@mail.ru

Описаны материалы на основе твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, которые в перспективе могут использоваться в качестве сенсоров, датчиков, устройств записи-считывания информации. Рассмотрены механизмы магнитоэлектрических эффектов и выяснен механизм магнитоэлектрической связи в области комнатных температур в отсутствие спинового порядка. Определены оптимальные условия возникновения магнитоэлектрического эффекта по температуре и концентрации. Приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для нескольких частот, в интервале температур $80\text{ K} < T < 400\text{ K}$ для состава $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,05$ и $x = 0,1$, без поля и в магнитном поле $0,8\text{ Тл}$. Магнитная проницаемость твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ определялась из индуктивности соленоида, внутрь которого помещался образец. Магнитная проницаемость измерялась при охлаждении образцов в нулевом магнитном поле и в поле $0,25\text{ Тл}$. При переходе в магнитоупорядоченное состояние температура максимума магнитной проницаемости сильно зависит от частоты и смещается в сторону высоких температур и на частоте 10 кГц имеет максимум в окрестности температуры Нееля. Добротность колебаний монотонно уменьшается при нагревании и проходит через максимум на частоте 10 кГц и через минимум – на частоте 50 кГц . Время релаксации зависит от температуры по степенному закону в парамагнитной области. Наблюдаемые аномалии динамических характеристик объясняются орбитальным магнитным моментом электронов. Обнаружены магнитоемкостные эффекты для $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,05$ и $x = 0,1$ при температурах выше комнатной, причем для $x = 0,05$ магнитоемкость меняет знак в окрестности 200 К . Магнитоемкостные эффекты объясняются в модели орбитального упорядочения электронов. Смена знака магнитоемкости по температуре объясняется образованием магнитного и орбитального упорядочения при разных температурах.

Ключевые слова: магнитоемкость, диэлектрическая проницаемость, индуктивность, добротность, магнитоемкостный эффект.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 696–704**MAGNETOCAPACITIVE EFFECTS IN SOLID SOLUTIONS $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$**

S. S. Aplesnin, A. M. Kharkov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: khark.anton@mail.ru

The paper describes the materials on the basis of solid solutions $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, which could be potentially used as sensors, sensor devices, read-write information. Mechanisms of magneto-electric effects were considered and the mechanism of magnetoelectric coupling at room temperatures in the absence of spin order was clarified. The optimal conditions for the occurrence of magnetoelectric effect on temperature and concentration are found. The results of measurements of dielectric permeability and dielectric loss tangent for several frequencies in the temperature range $80\text{ K} < T < 400\text{ K}$ for composition $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$, $x = 0.05$ and $x = 0.1$, without a field and in magnetic field 0.8 T were presented. The magnetic permeability of solid solutions $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ from the measurements of inductance of the solenoid with sample was determined. The magnetic permeability by cooling the sample in zero magnetic field and in the field of 0.25 T was measured. The shift of maximum in the temperature dependence of magnetic permeability in the vicinity of transition to the magnetically ordered state to high temperature versus frequency was found. Quality factor decreasing when heated and a maximum at a frequency of 10 kHz , and a minimum at a frequency of 50 kHz in the vicinity of Neel temperature was established. Relaxation time depends on the temperature according to the power law in the paramagnetic region. The observed anomalies are explained by the dynamic of the electron orbital magnetic moments. Magnetocapacitance effect in $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ with $x = 0.05$ and $x = 0.1$ at temperatures above room temperature was found. Changes in sign of magnetocapacitance in the vicinity of 200 K for $x = 0.05$ was determined. Magnetocapacitive effects are explained in

the model of the orbital ordering of electrons. Change in sign of magnetocapacitance on temperature is attributed to the formation of magnetic and orbital ordering at different temperatures.

Keywords: magnetocapacitance, dielectric permeability, inductance, quality factor, dielectric loss.

Введение. Материалы на основе твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ в перспективе могут использоваться в качестве сенсоров, датчиков, устройств записи-считывания информации. Изменение диэлектрической проницаемости в магнитном поле может найти применение при изготовлении СВЧ-приборов [1].

Взаимосвязь магнитных и электрических свойств является важным фактором для создания электронных устройств, действующих на новых принципах и открывающих новые направления, такие как спинтроника [2] и новые материалы-мультиферроики [3]. Для мультиферроиков характерно наличие магнитного и ферроэлектрического упорядочения [4]. Существуют два основных микроскопических механизма магнитоэлектрического эффекта – это спин-орбитальный механизм [5] и зависимость обменных взаимодействий от координат магнитных ионов [6] и их изменение в магнитном поле [7; 8]. На границе раздела магнитной и диэлектрической среды нарушается симметрия относительно инверсии пространства и времени и создаются условия для создания магнитоэлектрического эффекта. При наличии электрической неоднородности возможен магнетоемкостный эффект в отсутствие магнитного порядка [9], например, диэлектрический резонанс зависит от магнитного поля в результате изменения подвижности носителей тока в магнитном поле [10; 11].

Цель данной работы – выяснить механизм магнитоэлектрической связи в области комнатной температуры в отсутствие спинового порядка, определить оптимальные условия возникновения магнетоемкостного эффекта по температуре и по концентрации.

Для решения данных задач были проведены измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для ряда частот в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле, индуктивности и добротности магнитных колебаний.

Под магнитоэлектрическим эффектом понимают эффект возникновения намагниченности под действием электрического поля и электрической поляризации под действием магнитного поля: $M = \alpha E$; $P = \alpha H$, где M – намагниченность; E – электрическое поле; P – поляризация, H – магнитное поле; α – магнитоэлектрический коэффициент.

Под гигантской магнетоемкостью понимается относительное изменение диэлектрической проницаемости в магнитном поле: $MC(H) = (\epsilon(H) - \epsilon(0)) / \epsilon(0)$, где $\epsilon(H)$ – диэлектрическая проницаемость материала в магнитном поле H ; $\epsilon(0)$ – диэлектрическая проницаемость в отсутствие поля. Магнетоемкость MC принято измерять в процентах [3].

Линейный магнитоэлектрический эффект [12] может возникнуть в результате зависимости орбитальных магнитных моментов от полярных искажений, индуцированных под действием электрического поля, так называемый ионно-орбитальный вклад в магнитоэлектрический отклик. Средний орбитально-индуци-

рованный магнитный момент в электрическом поле, приложенном по оси, имеет намагниченность вдоль оси. Орбитальное упорядочение наблюдалось в оксидах железа [13] и манганитах [14; 15].

На основе симметричного анализа и новой методики расчета определен спиновый и орбитальный вклад в магнитоэлектрический эффект [12] для LiFePO_4 , который может быть сопоставим по величине со спиновым вкладом либо релятивистским, либо обменно-стрикционного происхождения в 3d-соединениях переходных металлов. Температурная зависимость магнитоэлектрического эффекта, вызванного орбитальным магнетизмом [16], совпадает с параметром порядка и с температурной зависимостью магнитострикции, что приводит к качественному согласию с экспериментальными данными для различных коллинеарных антиферромагнетиков, таких как Cr_2O_3 , LiCoPO_4 , TbPO_4 .

Если симметрия допускает связь между орбитальным магнитным моментом и полярным искажением, то величина магнитоэлектрического эффекта зависит не только от спин-орбитального взаимодействия, но и от величины щели между основным и возбужденным состояниями, для которых $\langle \psi_0 | L^z | \psi_n \rangle \neq 0$, а также от зависимости энергии ионных орбиталей от полярных искажений кристаллического поля. Большой магнитоэлектрический эффект, индуцированный орбитальным моментом, возможен в соединениях с анизотропным g -фактором и анизотропией магнитной восприимчивости в парамагнитном соединении, например, в веществах с низкой симметрией координации полярного кислорода, содержащих магнитные ионы с большим спин-орбитальным взаимодействием [12; 17].

В электрических неоднородных системах эффект Максвелла–Вагнера [10] и контактные эффекты могут привести к гигантским значениям диэлектрической проницаемости и диэлектрической релаксации в отсутствие дипольной релаксации [18]. Эффект Максвелла–Вагнера также может индуцировать магнетоемкость в отсутствие взаимодействия между магнитной и электрической подсистемами, при условии существования магнитосопротивления в материале [9]. Такие эффекты ясно демонстрируют, что наличие магнетоемкости не достаточно для отнесения этих соединений к мультиферроикам. С другой стороны, магнетоемкость без магнитоэлектрической связи может быть более практичной для технологических применений, так как не требуется существование дальнего магнитного порядка.

В работе [9] исследована двумерная (2D) композитная среда, описывающая характерные черты неупорядоченного материала, в предположении, что масштаб длины неоднородностей значительно больше, чем у всех масштабов длин микроскопических систем, например, длина свободного пробега электрона. Локальная плотность тока $j(\omega, r)$ связана с локальным электрическим полем $E(\omega, r)$ законом Ома:

$j(\omega, r) = \sigma(\omega, r) E(\omega, r) \equiv i\omega \epsilon(\omega, r) E(\omega, r)$, где $\sigma(\omega, r)$ является локальным тензором проводимости и $\epsilon(\omega, r)$ – локальная диэлектрическая функция. Модель справедлива при двух условиях: $1/\omega$ много больше времени рассеяния и собственная проводимость и диэлектрическая проницаемость каждой компоненты не зависят от частоты.

При низких частотах $\omega\tau < 1$ доминирует емкостное сопротивление, в то время как на высоких частотах $\omega\tau > 1$ напряжение в основном падает на резисторе, так как не хватает времени для зарядки конденсатора. Таким образом, при характерной частоте $\omega\tau = 1$ быстрое изменение действительной части диэлектрической проницаемости $\text{Re}[\epsilon_{xx}(\omega)]$ связано с пиком в мнимой части диэлектрической проницаемости $\text{Im}[\epsilon_{xx}(\omega)]$, что иллюстрирует проявление эффекта Максвелла–Вагнера в неоднородной смеси [11]. Неоднородность играет аналогичную роль в *dc*-магнитотранспортных свойствах в неупорядоченных средах, так как здесь смешивается холловское сопротивление с продольными компонентами проводимости, что приводит к линейной зависимости магнитосопротивления от магнитного поля [11].

Холловская компонента $\epsilon_{xx}(\omega)$ эквивалентна продольному диэлектрическому отклику из однородного материала в отсутствие магнитного поля с диэлектрической проницаемостью ϵ и сопротивлением β_r , которое является сопротивлением Холла для *dc*-магнитотранспорта. Продольный диэлектрический отклик $\epsilon_{xx}(\omega)$ состоит из смеси диэлектрических и резистивных компонент как в действительной, так и в мнимой частях.

Для больших магнитных полей $\beta > 1$ или для малых частот $\omega\tau < 1$ наблюдается диэлектрический резонанс при $\beta\omega\tau = 1$, где $\text{Im}[\epsilon_{xx}(\omega)]$ обладает ярко выраженным пиком и $\text{Re}[\epsilon_{xx}(\omega)]$ резко меняется. Резонансная частота определяется холловским сопротивлением β_r вместо концентрации p , как в обычном эффекте Максвелла–Вагнера. Положение пика в частотной области обратно пропорционально β . Если $\beta\omega\tau = 1$, то высота пика равна $\text{Im}[\epsilon_{xx}(\omega)] \approx \epsilon\beta/\sqrt{2}$ и растет линейно с полем. Однако величина релаксации в области резонансной частоты остается постоянной, потому что $\text{Re}[\epsilon_{xx}(\omega)] \approx \sqrt{2}p$ и действительная часть $\text{Re}[\epsilon_{xx}(\omega)]$ становится отрицательной для $\beta\omega\tau \geq 1$ и $\beta > 1$, но она обладает обычной диэлектрической релаксацией Максвелла–Вагнера в нулевом магнитном поле. Однако модель не работает и дает отсутствие релаксации, т. е. пик в $\text{Im}[\epsilon_{xx}(\omega)]$ отсутствует в нулевом магнитном поле $\beta = 0$ для всех концентраций. Хотя в простейших композитах из металла и диэлектрика наблюдается пик диэлектрической релаксации. Предполагается, что введение анизотропии может восстановить пик релаксации [19]. Зависимость диэлектрического резонанса от магнитного поля уже наблюдалась экспериментально в нанопористом кремнии [20], который можно представить в виде композита «проводник–диэлектрик».

В принципе, диэлектрический резонанс можно использовать в качестве магнитного датчика, обладающего повышенной чувствительностью к полям в окрестностях $\beta \sim 1/\omega\tau$. Поэтому задача состоит в том, чтобы сделать его эксплуатацию в диапазоне частот

$\omega = 1 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц}$ при комнатной температуре и для $H < 1 \text{ Тл}$. Этим требованиям удовлетворяют полупроводники с большой шириной запрещенной зоны $\Delta > 0,5 \text{ эВ}$ и высокой подвижностью $\mu > 1 \text{ Т}^{-1}$. В работе [9] продемонстрирована возможность существования магнитоемкости в области комнатных температур в немагнитных материалах с неоднородным распределением плотности электрического заряда. В рамках простой двумерной, двухкомпонентной композитной среды вычислили характерный диэлектрический резонанс, который зависит от магнитного поля.

Экспериментальные результаты. Диэлектрические свойства твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ исследовались на основе измерений действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в области температур $80 \text{ К} < T < 400 \text{ К}$ без поля и в магнитном поле $H = 0,8 \text{ Тл}$ для составов с $x = 0,05$ и $x = 0,1$.

Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости измерены в области температур $80 \text{ К} < T < 400 \text{ К}$ на четырех частотах: $\omega = 1, 10, 66$ и 100 кГц , в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле $H = 0,8 \text{ Тл}$. На рис. 1 изображены температурные зависимости диэлектрической проницаемости, измеренные на частоте $\omega = 10$ и 100 кГц для состава с $x = 0,05$. С ростом температуры диэлектрическая проницаемость растет и имеет точку перегиба в интервале $180\text{--}190 \text{ К}$, причем соответствующая температура сдвигается в область высоких температур с ростом частоты. Диэлектрическая проницаемость имеет широкий максимум при $T = 280 \text{ К}$ на частоте $\omega = 100 \text{ кГц}$, и величина магнитоемкостного эффекта составляет 35 % в окрестности этой температуры. Относительное изменение диэлектрической проницаемости в магнитном поле представлено на рис. 1, а. В области низких температур магнитоемкость отрицательна и наблюдается смена знака с отрицательного на положительный при $T = 182 \text{ К}$ и $T = 204 \text{ К}$ соответственно для частот $\omega = 10$ и 100 кГц . В области комнатной температуры магнитоемкость увеличивается на порядок при изменении частоты с $\omega = 10$ до 100 кГц .

Мнимая часть диэлектрической проницаемости резко увеличивается в интервале температур $155 \text{ К} < T < 190 \text{ К}$ и при дальнейшем нагревании практически не зависит от температуры на частоте $\omega = 10 \text{ кГц}$ и имеет максимум в $\text{Im}(\epsilon)$ при $T = 250 \text{ К}$, который сдвигается до $T = 270 \text{ К}$ в магнитном поле (рис. 2). В магнитном поле динамическая проводимость уменьшается в интервале $105 \text{ К} < T < 180 \text{ К}$ и в интервале $230 \text{ К} < T < 300 \text{ К}$ и увеличивается при $T > 137 \text{ К}$ соответственно на частотах $\omega = 10$ и 100 кГц для состава с $x = 0,05$ [21].

В твердом растворе $\text{Yb}_{0,1}\text{Mn}_{0,9}\text{S}$ температуры максимумов $d\text{Re}(\epsilon)/dT$ совпадают с максимумами мнимой части диэлектрической проницаемости (рис. 3), с ростом частоты для $\omega = 1, 10$ и 100 кГц сдвигаются в область высоких температур при $T = 126, 147$ и 172 К и описываются в модели дебаевской релаксации дипольного момента. В области комнатных температур $T = 275\text{--}283 \text{ К}$ наблюдается острый максимум в $\text{Re}(\epsilon(T))$ (рис. 3). Величина диэлектрической проницаемости уменьшается с ростом частоты по степенному закону: $\text{Re}(\epsilon(\omega)) \sim 1/\omega^n$, однако в магнитном поле $\text{Re}(\epsilon(\omega))$ растет с увеличением частоты при $T < 150 \text{ К}$, что характерно для неупорядоченных систем, например в дипольных стеклах.

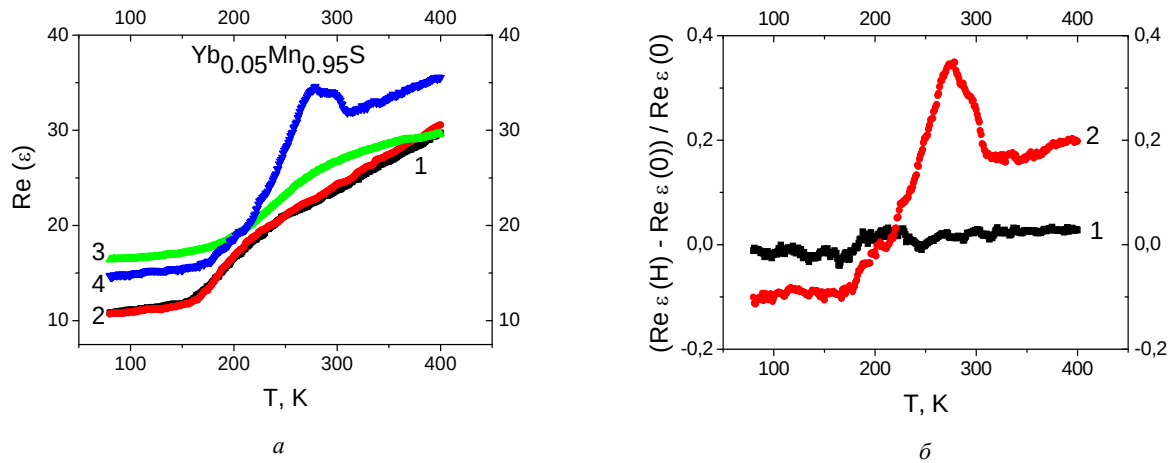


Рис. 1. Температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости для образца $Yb_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,05$ без поля на частотах 10 кГц (1), 100 кГц (3) и в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (2), 100 кГц (4) (а); относительное изменение действительной части диэлектрической проницаемости в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (1) и 100 кГц (2) (б)

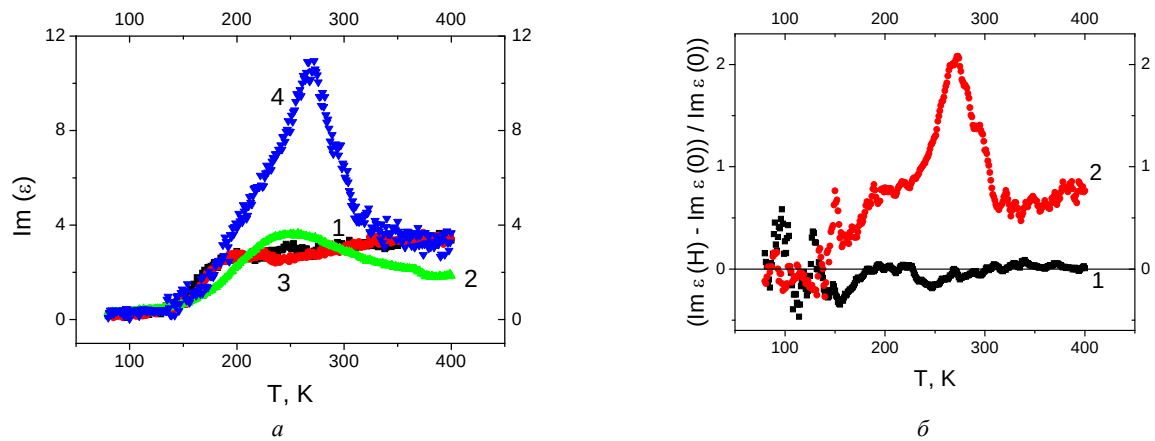


Рис. 2. Температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости для образца $Yb_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,05$ без поля на частотах 10 кГц (1), 100 кГц (2) и в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (3), 100 кГц (4) (а); относительное изменение мнимой части диэлектрической проницаемости в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (1) и 100 кГц (2) (б)

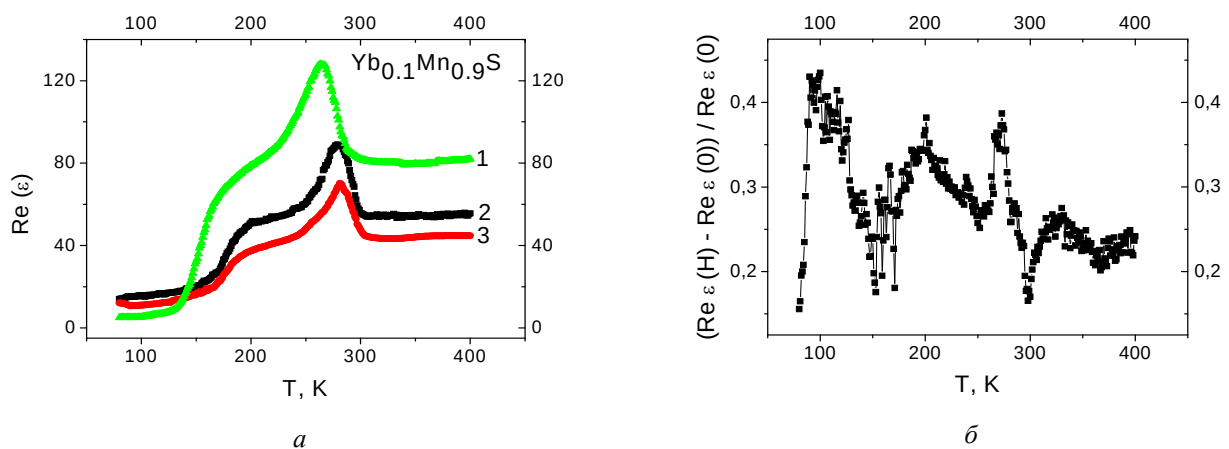


Рис. 3. Температурная зависимость $Re(\epsilon)$ для образца $Yb_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,1$ без поля на частоте 100 кГц (2) и в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (1), 100 кГц (3) (а); относительное изменение $Re(\epsilon)$ в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частоте 100 кГц (б)

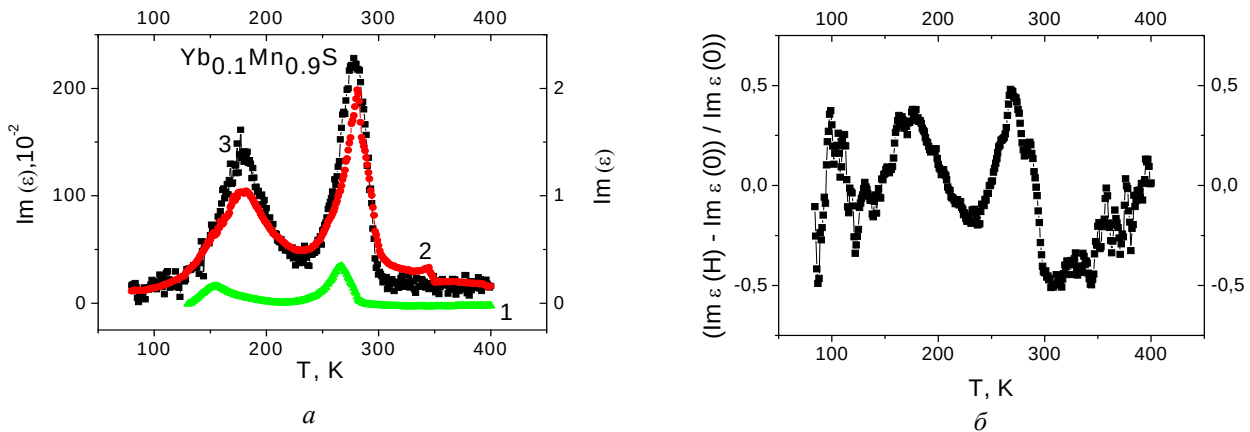


Рис. 4. Температурная зависимость $\text{Im}(\epsilon)$ для образца $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,1$ без поля на частоте 100 кГц (2) и в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частотах 10 кГц (1), 100 кГц (3) (a); относительное изменение $\text{Im}(\epsilon)$ от температуры в магнитном поле $H = 0,8$ Тл на частоте 100 кГц (б)

Магнетоемкость, определенная как $\delta(\epsilon) = (\epsilon(H) - \epsilon(0)) / \epsilon(0)$, резко возрастает при переходе в магнитоупорядоченное состояние при $T < T_N$, проходит через максимум и асимптотически исчезает при $T = 75$ К. Возможный механизм связан с магнитоупругим взаимодействием. По сравнению с $x = 0,05$ наблюдается дополнительный максимум в $\delta(\epsilon)$ при $T = 200$ К и аналогичный максимум при $T = 277$ К, который сопровождается максимумом диэлектрических потерь и максимумом в оптической проводимости, изображенной на рис. 4. В области комнатных температур и выше магнетоемкость составляет $\sim 25\%$ [21; 22].

Магнитная проницаемость твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ определялась из индуктивности соленоида с внутренним диаметром $d = 2$ мм и длиной 10 мм, внутрь которого помещался образец. Измерялась индуктивность катушки с образцом (L_f) и без образца (L_s), так как индуктивность соленоида пропорциональна $L = n^2 \mu_0 V$, то магнитную проницаемость μ_r образца с объемом V_f найдем как $\mu_r = (L_f - L_s) / L_s + 1$ [23].

Проницаемость μ_r измерялась при охлаждении образцов в нулевом магнитном поле и в поле 0,5 Тл. Для состава с $x = 0,1$ ниже $T = 190$ К наблюдается различие ($\mu_r^{\text{ZF}} - \mu_r^{\text{FC}}$) и минимум на температурной зависимости магнитной проницаемости при $T = 295$ К с дальнейшим монотонным ее увеличением.

При переходе в магнитоупорядоченное состояние температура максимума магнитной проницаемости сильно зависит от частоты и смещается в сторону высоких температур от $T = 112$ К ($\omega = 0,1$ кГц), $T = 136$ К ($\omega = 1$ кГц) к $T = 169$ К ($\omega = 10$ кГц) на частотах меньше и включая 10 кГц (рис. 5) и на частоте 10 кГц имеет максимум в окрестности температуры Нееля.

Добротность колебаний монотонно уменьшается при нагревании, как видно на рис. 6, и проходит через максимум на частоте 10 кГц и через минимум – на частоте 50 кГц. В магнитоупорядоченной фазе добротность колебаний и время релаксации колебаний намагниченности обнаруживают зависимость от пре-

дыстории образца. Время релаксации $\tau = Q / \pi$ зависит от температуры по степенному закону в парамагнитной области. Относительное изменение добротности магнитных колебаний наглядно показано на рис. 7. Наблюдаемые аномалии динамических характеристик объясняются орбитальным магнитным моментом электронов.

Модель и обсуждение результатов. Из экспериментальных результатов по диэлектрическим, электрическим и магнитным свойствам можно выделить три интервала температур: два низкотемпературных – $T = 160\text{--}180$ К, $260\text{--}290$ К и высокотемпературный – $470\text{--}490$ К. Низкотемпературная аномалия связана с конденсацией ян-теллеровской моды. В результате химического давления происходит перераспределение электронной плотности между t_{2g} - и e_g -состояниями, либо в результате гибридизации 3d- и 5d-волновых функций часть электронов ионов марганца переходят в зонные состояния и образуются дырки в t_{2g} - и e_g -состояниях Mn^{2+} , т. е. ион марганца становится ян-теллеровским ионом, и при понижении температуры понижается кубическая симметрия ионов марганца, например, за счет смещения иона из центра октаэдра с образованием квазивыврожденных состояний по кубическим осям кристалла. Можно предположить, что в интервале $160\text{--}180$ К образуется дипольное стекло, для которого характерно смещение максимума мнимой части диэлектрической проницаемости в область высоких температур с ростом частоты. При нагревании выше 160 К в окрестности температуры замерзания диполей диэлектрическая проницаемость растет. В этой области температур также меняется объем решетки, найденный из коэффициента теплового расширения, и наблюдается небольшой скачок в магнитной восприимчивости в результате уменьшения косвенного обменного взаимодействия через анион серы, так как $J = 2(t + \delta)(t - \delta) / (E_{\text{Mn}} - E_s + U)$, где δ – смещение иона из центросимметричного положения иона [24].

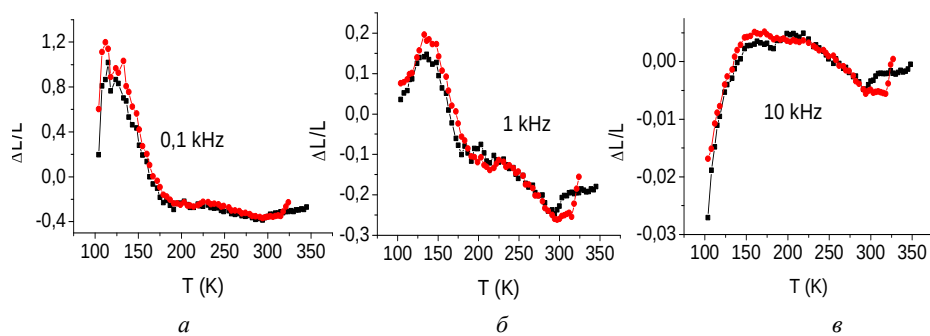


Рис. 5. Относительное изменение индуктивности образцов, охлажденных в нулевом магнитном поле (квадрат) и в поле (кружок), от температуры для $x = 0,1$ на частотах 0,1 кГц (а); 1 кГц (б); 10 кГц (в)

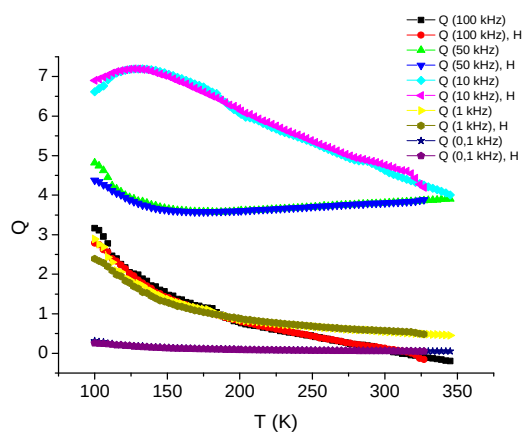


Рис. 6. Добротность магнитных колебаний в образце, охлажденном в магнитном поле и без поля, от температуры для $x = 0,1$

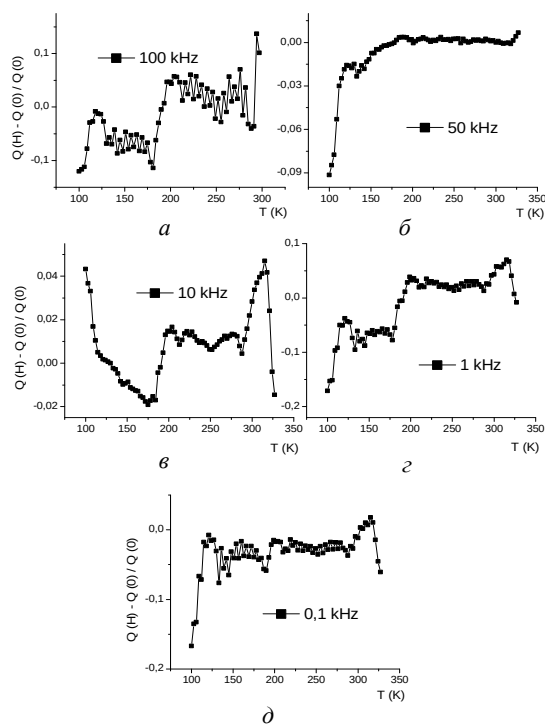


Рис. 7. Относительное изменение добротности магнитных колебаний в образце $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ с $x = 0,1$, охлажденном в магнитном поле и без поля, от температуры на частотах 100 кГц (а); 50 кГц (б); 10 кГц (в); 1 кГц (г); 0,1 кГц (д)

В области температур 260–290 К наблюдается корреляция в изменении температурных зависимостей диэлектрической проницаемости ($\epsilon(T)$ имеет максимум), минимум в коэффициенте теплового расширения от температуры и отклонение магнитной восприимчивости от закона Кюри–Вейсса. Возможно, это обусловлено поворотом октаэдра, содержащего внутри ион иттербия, и концентрация таких кластеров максимальна при $x = 0,08$ и резко падает с ростом концентрации иттербия. Полярные смещения ионов серы вызывают рост диэлектрической проницаемости, понижения локального кристаллического поля на ближайших ионах марганца в окрестности редкоземельного иона индуцируют расщепление и сдвиг t_{2g} -состояний ионов иттербия и индуцируют орбитальный магнитный момент, направления которого вырождены вследствие поворота октаэдра вокруг одной из трех осей 4-го порядка. Это вырождение снимается внешним магнитным полем и обуславливает магнетоемкость твердых растворов $Yb_xMn_{1-x}S$. Смягчение локальных оптических мод колебаний приведет к максимуму в мнимой части диэлектрической проницаемости из-за фонов-фононного взаимодействия и к максимуму в действительной части диэлектрической проницаемости. При этой температуре к спиновому моменту добавляется орбитальный момент, что приводит к увеличению эффективного момента и к уменьшению величины наклона обратной магнитной восприимчивости.

Одним из механизмов, объединяющих эти эффекты, является уменьшение подвижности электронов и образование фазового расслоения электронов на гра-

нице раздела Mn–Yb. Частичная локализация электронов на интерфейсе Mn–Yb является причиной образования объемной неоднородности электрического заряда. В отсутствие магнитного поля электрический заряд распределен в плоскостях xy , xz , yz (рис. 8).

В магнитном поле, направленном перпендикулярно к одной из плоскостей, происходит перераспределение заряда, и заряд движется в плоскости перпендикулярно полю на границе раздела Mn–Yb, что схематично представлено на рис. 8. Это эквивалентно представлению о двух параллельно соединенных конденсаторах без поля, а в поле сохраняется заряд на одном из конденсаторов, и, соответственно, емкость увеличивается в два раза.

Заключение. Для твердых растворов $Yb_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,05$ и $x = 0,1$ найдено смещение максимума диэлектрических потерь в сторону высоких температур в интервале $160\text{ K} < T < 200\text{ K}$ с ростом частоты и рост диэлектрической проницаемости от частоты ниже 160 К, что характерно для дипольного стекла.

Обнаружены магнетоемкостные эффекты для $Yb_xMn_{1-x}S$ с $x = 0,05$ и $x = 0,1$ при температурах выше комнатной, причем для $x = 0,05$ магнетоемкость меняет знак в окрестности 200 К.

При переходе в магнитоупорядоченное состояние температура максимума магнитной проницаемости сильно зависит от частоты и смещается в сторону высоких температур и на частоте 10 кГц имеет максимум в окрестности температуры Нееля. Добротность колебаний монотонно уменьшается при нагревании. Время релаксации зависит от температуры по степенному закону в парамагнитной области.

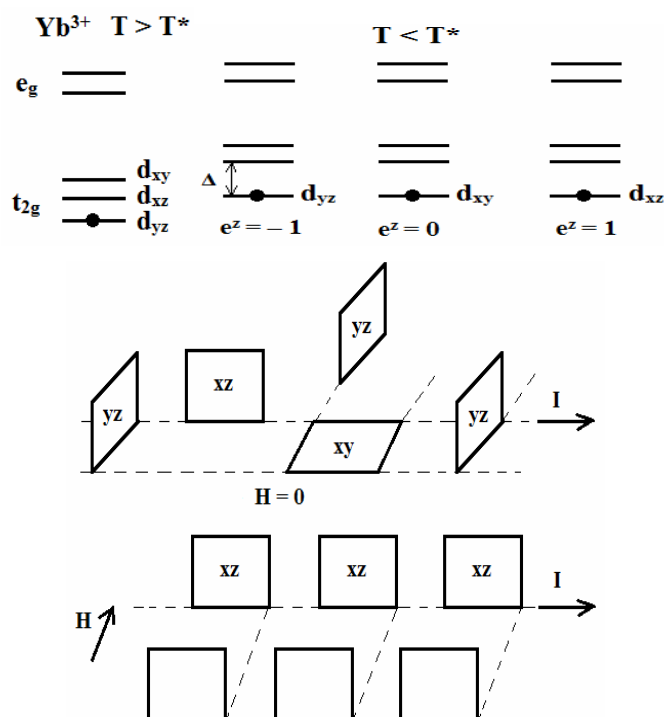


Рис. 8. Снятие вырождения электронной структуры ионов Yb

Магнитоёмкостные эффекты объясняются в модели орбитального упорядочения электронов. Смена знака магнитоёмкости по температуре объясняется образованием магнитного и орбитального упорядочения при разных температурах.

Библиографические ссылки

1. Аплеснин С. С. Основы спинтроники. СПб. : Лань, 2010. 283 с.
2. Aplesnin S. S. Influence of spin-phonon coupling on the magnetic moments in 2D spin-1/2 antiferromagnet // *Phys. Lett. A*. 2003. Vol. 313. P. 122–125.
3. Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // *УФН*. 2012. Т. 182, № 6. С. 593–620.
4. Khomskiy D. Classifying multiferroics: Mechanisms and effects // *Physics*. 2009. Vol. 20. P. 101–103.
5. Gehring G. A. On the microscopic theory of the magnetoelectric effect // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 161, № 1. P. 275–285.
6. Аплеснин С. С. Квантовые осцилляции магнитострикции в двумерном антиферромагнетике со спин-фононным взаимодействием в магнитном поле // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 79. С. 59–62.
7. Aplesnin S. S., Piskunova N. I. Influence of the four-spin exchange interaction on the magnetic properties of manganites // *J. Phys.: Condens. Matt.* 2005. Vol. 17. P. 5881–5886.
8. Hornreich R. M., Shtrikman S. Statistical Mechanics and Origin of the Magnetoelectric Effect in Cr_2O_3 // *Phys. Rev. B*. 1967. Vol. 161. P. 506–512.
9. Catalan G. Magnetocapacitance without magnetoelectric coupling // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 902–908.
10. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in non-magnetic inhomogeneous media // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 11. P. 99–105.
11. Parish M. M., Littlewood P. B. Non-saturating magnetoresistance in an inhomogeneous semiconductor // *Nature*. 2003. Vol. 426. P. 159–165.
12. Scaramucci A., Bousquet E. Magnetoelectric Effect by Orbital Magnetism // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 109, № 19. P. 654–662.
13. Аплеснин С. С., Баринов Г. И. Орбитальное упорядочение в магнетите выше температуры Вервея, индуцируемое давлением // *ФТТ*. 2007. Т. 49, № 10. С. 1858–1861.
14. Аплеснин С. С. Роль флуктуации связей на транспортные свойства в манганитах и никелатах // *ЖЭТФ*. 2007. Т. 131, № 5. С. 878–884.
15. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. Magnetic structures upon ordering of eg orbitals in a square lattice // *J. Phys.: Condens. Matt.* 2008. Vol. 20. P. 325202–325203.
16. Аплеснин С. С., Москвин А. И. Влияние сильных электронных корреляций и взаимодействия электронов с решеткой на орбитальное упорядочение электронов // *ЖЭТФ*. 2010. Т. 92, № 4. С. 254–259.
17. The interrelation of magnetic and dielectric properties of $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matt.* 2010. Vol. 22. P. 226006–226015.

18. Lunkenheimer P., Bobnar V. Origin of apparent colossal dielectric constants // *Phys. Rev. B*. 2002. Vol. 66. P. 105–116.

19. Murtanto T. B., Natori S. Ac conductivity and dielectric constant of conductor-insulator composites // *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 74, № 11. P. 206–211.

20. Lucovsky G., Long J. P. Predeposition plasma nitridation process applied to Ge substrates to passivate interfaces between crystalline-Ge substrates and Hf-based high-K dielectrics // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. 2009. Vol. 27, № 1. P. 505–507.

21. Аплеснин С. С., Харьков А. М. Диэлектрическая проницаемость твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($x = 0, 1, 0, 2$) // *Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. Красноярск, 2012*. С. 419–420.

22. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sokolov V. V. Gigantic magnetocapacitive effect into $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ // *Trends in magnetism : Abstract for Euro-Asian Symposium. EASTMAG. Vladivostok, 2013*. P. 33–34.

23. Magnetic properties of semiconductors $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / S. S. Aplesnin [et al.] // *Book of Abstracts JEMS*. 2012. P. 271–272.

24. Магнитные и электрические свойства твердых растворов $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ / С. С. Аплеснин [и др.] // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 77, № 10. С. 1472–1474.

References

1. Aplesnin S. S. *Osnovy spintroniki* [Basis of spintronics]. St.Petersburg, Lan' Publ., 2010, 283 p.
2. Aplesnin S. S. Influence of spin-phonon coupling on the magnetic moments in 2D spin-1/2 antiferromagnet. *Phys. Lett. A*, 2003, Vol. 313, P. 122–125.
3. Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. [Magnetoelectric materials and multiferroics]. *UFN*, 2012, Vol. 182, No. 6, P. 593–620 (In Russ.).
4. Khomskiy D. Classifying multiferroics: Mechanisms and effects. *Physics*, 2009, Vol. 20, P. 101–103.
5. Gehring G. A. On the microscopic theory of the magnetoelectric effect. *Ferroelectrics*, 1994, Vol. 161, No. 1, P. 275–285.
6. Aplesnin S. S. [Quantum oscillations of the magnetostriiction in a two-dimensional antiferromagnet with spin-phonon interaction in a magnetic field]. *ZhETF*, 2004, Vol. 79, P. 59–62 (In Russ.).
7. Aplesnin S. S., Piskunova N. I. Influence of the four-spin exchange interaction on the magnetic properties of manganites. *J. Phys.: Condens. Matt.*, 2005, Vol. 17, P. 5881–5886.
8. Hornreich R. M., Shtrikman S. Statistical Mechanics and Origin of the Magnetoelectric Effect in Cr_2O_3 . *Phys. Rev. B*, 1967, Vol. 161, P. 506–512.
9. Catalan G. Magnetocapacitance without magnetoelectric coupling. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, Vol. 88, P. 902–908.
10. Parish M. M., Littlewood P. B. Magnetocapacitance in non-magnetic inhomogeneous media. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, Vol. 11, P. 99–105.
11. Parish M. M., Littlewood, P. B. Non-saturating magnetoresistance in an inhomogeneous semiconductor. *Nature*, 2003, Vol. 426, P. 159–165.

12. Scaramucci A., Bousquet E. Linear Magnetoelectric Effect by Orbital Magnetism. *Physical Review Letters.*, 2012, Vol. 109, No. 19, P. 654–662.
13. Aplesnin S. S., Barinov G. I. [Orbital ordering in magnetite above the temperature of Verwey induced pressure]. *FTT*, 2007, Vol. 49, No. 10, P. 1858–1861 (In Russ.).
14. Aplesnin S. S. [Role of fluctuation relations for the transport properties in manganites and nichelato]. *ZhETF.*, 2007, Vol. 131, No. 5, P. 878–884 (In Russ.).
15. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. Magnetic structures upon ordering of eg orbitals in a square lattice. *J. Phys.: Condens. Matt.*, 2008, Vol. 20, P. 325202–325203.
16. Aplesnin S. S., Moskvina A. I. [The influence of strong electronic correlations and interaction of the electrons with the lattice on the orbital ordering of the electrons]. *ZhETF.*, 2010, Vol. 92, No. 4, P. 254–259 (In Russ.).
17. Aplesnin S. S., Bandurina O. N., Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Balaev A. D., Eremin E. V. The interrelation of magnetic and dielectric properties of $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ solid solutions. *J. Phys.: Condens. Matt.*, 2010, Vol. 22, P. 226006–226015.
18. Lunkenheimer P., Bobnar V. Origin of apparent colossal dielectric constants. *Phys. Rev. B.*, 2002, Vol. 66, P. 105–116.
19. Murtanto T. B., Natori S. Ac conductivity and dielectric constant of conductor-insulator composites. *Phys. Rev. B.*, 2006, Vol. 74, No. 11, P. 206–211.
20. Lucovsky G., Long J. P. Predeposition plasma nitridation process applied to Ge substrates to passivate interfaces between crystalline-Ge substrates and Hf-based high-K dielectrics. *Journal of Vacuum Science and Technology B.*, 2009, Vol. 27, No. 1, P. 505–507.
21. Aplesnin S. S., Kharkov A. M. [The dielectric permeability of solid solutions $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ ($x = 0.1, 0.2$)]. *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XVI Intern. scientific. Conf. "Reshetnev Readings"]. Krasnoyarsk, 2012, P. 419–420 (In Russ.).
22. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sokolov V. V. Gigantic magnetocapacitive effect into $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. *Abstract for Euro-Asian Symposium "Trends in magnetism", EASTMAG*, Vladivostok, 2013, P. 33–34.
23. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Romanova O. B., Sokolov V. V., Yanushkevich K. Magnetic properties of semiconductors $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$. *Book of Abstracts JEMS*, 2012, P. 271–272.
24. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Romanova O. B., Yanushkevich K. I., Galyas A. I., Sokolov V. V. [Magnetic and electrical properties of solid solutions $\text{Yb}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2013, Vol. 77, No. 10, P. 1472–1474 (In Russ.).

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
НА УТЕЧКИ ЧЕРЕЗ ТОРЦЕВОЕ УПЛОТНЕНИЕ**

А. А. Ашейчик*, В. Л. Полонский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Российская Федерация, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
*E-mail: aseichik52@mail.ru

Рассмотрены вопросы влияния формы контактирующих поверхностей на утечки через резиновое уплотнение в неподвижном соединении узлов аэрокосмической техники. Из практики эксплуатации уплотнений различных конструкций ракетно-космической техники известно, что форма контактирующих поверхностей, а следовательно, и форма эпюры напряжений в зоне контакта значительно влияют на величину утечек. В литературе, однако, практически отсутствуют сведения о влиянии на утечки распределения контактных напряжений по ширине площадки контакта. Таким образом установление связи между величиной утечек и распределением контактных напряжений позволит, во-первых, точнее рассчитывать величину утечек для существующих уплотнений, а во-вторых, оптимизировать форму уплотнений при их проектировании в каждом конкретном случае.

Предложена конструкция установки и методика исследований утечек через неподвижное торцевое уплотнение. Объектом исследования являлось неподвижное торцевое кольцевое уплотнение. При испытаниях в кольцевую прокладку из резины вдавливались кольцевые инденторы различной формы. Глубина внедрения регулировалась и измерялась с высокой точностью. Этим моделировались различные варианты распределения контактных напряжений по ширине площадки контакта. Через газовый редуктор во внутреннюю полость уплотнения подавался воздух под разным давлением и производилось измерение утечек. Получены экспериментальные зависимости величины утечек от избыточного давления при различных величинах внедрения выступа в резину.

Разработанные конечно-элементные модели трех используемых в эксперименте уплотнений с различными формами инденторов и использование программы STAR позволили теоретически изучить распределение напряжений по ширине площадки контакта. Результатом этой экспериментально-теоретической работы явилось создание новой конечно-элементной программы для расчета утечек через неподвижные резиновые уплотнения LEAKAGES, учитывающей форму резиновых прокладок, вязкоупругие свойства резины, а также явления релаксации и ползучести. В результате экспериментальных исследований по внедрению кольцевых инденторов различных профилей в резиновую неподвижную прокладку установлено, что за счет оптимизации формы индентора величина утечек может быть снижена в 10 раз. Разработана конечно-элементная программа для расчета утечек, которая позволяет оптимизировать форму вновь создаваемых резиновых уплотнений для аэрокосмической техники.

Ключевые слова: утечки, торцевое уплотнение, резина, контактные напряжения, индентор, метод конечных элементов, прогнозирование.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 705–713**INFLUENCE OF DISTRIBUTION OF CONTACT PRESSURE
ON LEAKAGE THROUGH CASSET**

A. A. Asheichik*, V. L. Polonsky

Peter the Great St.-Petersburg Polytechnical University
29, Polytechnicheskaya St., St.-Petersburg, 195251, Russian Federation
*E-mail: aseichik52@mail.ru

The questions of influence of the shape of contact surfaces on leakages through rubber seals in fixed connection of subassemblies of space technics are considered in the article. It is known from practice of operation of seals of various designs of space-rocket hardware that the shape of contact surfaces and consequently also the shape of diagram of stresses in a contact zone, considerably influences the leaks value.

The design of test equipment and technique of leaks study through fixed face seal is offered. Object of research is the fixed face ring seal. During the tests into a ring rubber seal the ring indentors of various shape were pressed. The depth of introduction was regulated and measured with split-hair accuracy. Thus various variants of distribution of contact stresses on width of a contact area were modelled. The air was delivered under different pressure through a gas reducer in an internal cavity of seal and measurement of leaks was made. Experimental dependences of leaks value vs external pressure at various values of introduction of the peak into rubber are received.

The developed finite-element models of three seals used in experiment with various shapes of indentors and program STAR has allowed to theoretically study distribution of stresses on width of a contact area. The result of this experimentally-theoretical work was creation of the new finite-element program for calculation of leaks through fixed rubber seals LEAKAGES, considering the shape of rubber seals, viscoelastic properties of rubber, including the relaxation and creep phenomenon. As a result of experimental researches on introduction ring indentors of different profiles into a rubber fixed gasket it was found that at the expense of shape optimization of indenter the leaks value can be lowered 10 times. The finite-element program for calculation of leaks which allows optimizing the shape of created rubber seals for the aerospace equipments is developed.

Keywords: leakages, face seal, rubber, contact stresses, indenter, finite element analysis, prediction.

Введение. В узлах аэрокосмической техники, а также в стендах для испытаний элементов аэрокосмических конструкций широко используются неподвижные резиновые уплотнения для герметизации объемов с высокими давлениями [1]. Утечки через круглое торцевое уплотнение могут быть определены [2] по формуле

$$Q = \frac{\pi}{6 \ln R_1 / R_2} \frac{\Delta p}{\eta} \psi_0 R_z^3 \exp\left(-\frac{3\sigma_n}{kE}\right), \quad (1)$$

где Q – утечки через уплотнение; R_1 и R_2 – наружный и внутренний радиусы прокладки; Δp – перепад давлений; η – вязкость уплотняемой среды; ψ_0 – коэффициент формы микронеровностей; R_z – параметр шероховатости уплотняемой поверхности; σ_n – нормальное напряжение на контакте; E – модуль упругости уплотнителя; k – коэффициент, учитывающий особенности конкретной физической модели (0,05–0,3).

Формула (1) получена из уравнений Навье–Стокса для ламинарного течения газа без учета центробежных сил. Из анализа приведенного выражения для определения утечек следует, что они в значительной степени зависят от величины напряжений в зоне контактирования уплотнителя с уплотняемой поверхностью. Величина этого напряжения, как известно [2; 3], зависит как от давления предварительного поджатия $p_{ко}$, так и в некоторых конструкциях уплотнений от перепада давлений уплотняемой среды Δp . При использовании формулы (1) обычно используется среднее значение нормальных напряжений.

Из практики эксплуатации уплотнений различных конструкций [4–6] известно, что форма контактирующих поверхностей, а следовательно, и форма эпюры напряжений в зоне контакта значительно влияют на величину утечек. В литературе, однако, практически отсутствуют сведения о влиянии на утечки распределения контактных напряжений по ширине площадки контакта. Использование современных конечно-элементных программ позволяет с высокой точностью рассчитать распределение контактных напряжений в зоне контакта с учетом вязкоупругих свойств уплотнения, явлений релаксации и ползучести [7–12]. Таким образом, установление связи между величиной утечек и распределением контактных напряжений позволит, во-первых, точнее рассчиты-

вать величину утечек для существующих уплотнений, а во-вторых, оптимизировать форму уплотнений при их проектировании в каждом конкретном случае.

Установка для исследований и методика испытаний. Схема установки для изучения утечек через торцевое уплотнение представлена на рис. 1, внешний вид элементов конструкции установки с фотографиями кольцевых инденторов и их схемами приведен на рис. 2.

Объектом исследования являлось неподвижное торцевое кольцевое уплотнение 1 (рис. 1). При испытаниях кольцевая прокладка из резины зажималась между двумя стальными фланцами 3 и 4. Во внутреннюю полость уплотнения подавался воздух под давлением 0–1,5 МПа. Воздух подавался из газового баллона 7, где его давление составляло 15 МПа, через газовый редуктор 8. Точность регулировки и измерения избыточного давления составляла 0,01 МПа. Утечки измерялись с наружной стороны прокладки (штуцер 10) [13].

Кольцевая прокладка прямоугольного сечения из резины 1 имела наружный диаметр 36 мм, внутренний диаметр 16 мм и высоту 4 мм. Она помещалась в кольцевую канавку на стальном фланце 3 глубиной 2,6 мм и диаметрами, равными диаметрам прокладки, и приклеивалась. В противоположный фланец закладывались сменные кольцевые инденторы 2 различной формы (3 варианта – см. рис. 2).

В первом варианте это был прямоугольный выступ шириной 1,8 мм с радиусами 0,3 мм по краям (ширина плоской части 1,2 мм). Во втором варианте сечение выступа представляло собой равносторонний треугольник с углом у вершины 90° и радиусом у вершины 0,5 мм. В третьем варианте это был прямоугольный выступ шириной 0,4 мм с радиусом у вершины 0,2 мм. Шероховатость поверхности выступов соответствовала $Ra = 1,25$ мкм. Статический модуль упругости резины составлял $E = 3,2$ МПа. Средний диаметр выступов во всех вариантах был один и тот же и составлял 25,8 мм, а высота – 1,8 мм. Давление предварительного поджатия $p_{ко}$ создавалось шестью болтовыми соединениями, расположенными равномерно по окружности фланцев. Перемещение регулировалось и измерялось инструментальными измерительными плитками 6 (рис. 1) с точностью 0,01 мм.

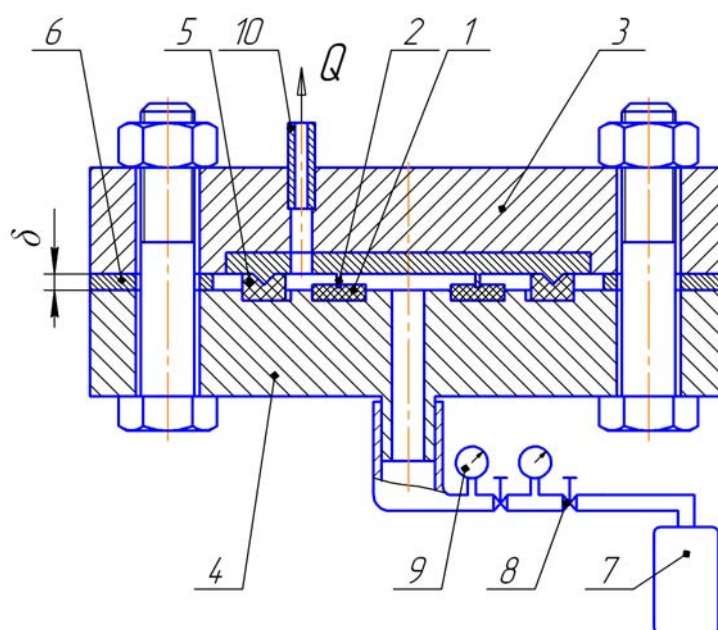


Рис. 1. Схема установки для изучения утечек через торцевое уплотнение

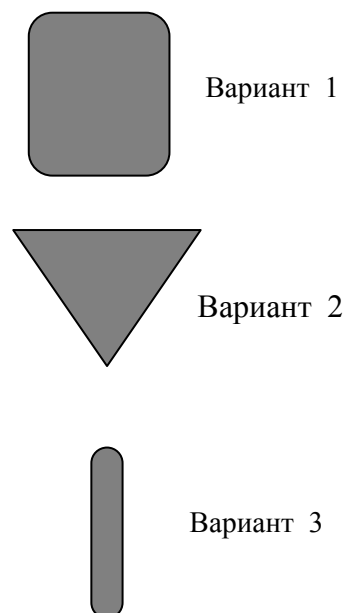


Рис. 2. Внешний вид элементов конструкции установки и схемы вариантов инденторов

Методика испытаний заключалась в следующем. В канавку на стальном фланце устанавливалась резиновая кольцевая прокладка. Посредством болтовых соединений и мерительных плиток b устанавливалось заданное минимальное внедрение δ кольцевого выступа – индентора, изготовленного по первому варианту, в резину. При этом непосредственно регулировался и измерялся наружный зазор между фланцами.

Затем через газовый редуктор во внутреннюю полость уплотнения подавалось заданное минимальное давление воздуха и производилось измерение утечек. После этого давление воздуха увеличивалось, и измерение утечек повторялось. После измерения утечек во всем диапазоне давлений при первом минимальном значении внедрения индентора его величину увеличивали до следующего значения, и все измерения повто-

рялись. В той же последовательности проводились измерения для двух других вариантов инденторов. Для каждого нового варианта выступа и параллельных опытов устанавливалась новая резиновая прокладка.

Результаты экспериментальных исследований. В результате исследований были получены экспериментальные зависимости величины утечек от избыточного давления при различных величинах внедрения выступа в резину. Эти зависимости для всех трех вариантов формы индентора представлены на рис. 3–5. Анализ результатов показывает, что для всех вариантов формы инденторов и при всех значениях внедрения индентора в резину наблюдается линейная зависимость величины утечек от перепада давлений уплотняемой среды, что соответствует формуле (1).

Использование геометрического коэффициента подобия позволяет привести зависимости, представленные на рис. 3–5, к базовому варианту (вариант 1). На рис. 6 в качестве примера приведены результаты такого пересчета для внедрения индентора $\delta = 0,2$. На этом рисунке зависимость для первого варианта взята из рис. 3 без изменений, все значения перепадов давлений из рис. 4 и 5 для второго варианта разделены на 2,17 (табл. 1), а для третьего варианта – разделены на 4,37 (табл. 1). Такое приведение дает возможность исключить влияние на утечки всех факторов, кроме концентрации напряжений, создаваемой индентором в вариантах 2 и 3. На рис. 6 видно, что утечки во втором варианте примерно в 2 раза меньше, чем в первом (базовом) варианте, а в третьем варианте различие достигает 10 раз. Таким образом, использование формулы (1) для расчета утечек без учета возникающих максимальных напряжений в конструкциях уплотнений может привести к ошибкам, достигающим 1 000 %.

Анализ выражения (1) позволяет определить превышение максимальных напряжений $\sigma_{\max}$ над средними напряжениями σ_m . Это может быть выполнено путем использования результатов двух серий экспериментов. В первой серии для базового варианта (первого) $\sigma_{\max} = \sigma_m$. Во второй серии $\sigma_{\max}$ должны значительно превышать средние напряжения, что и достигалось для второго и третьего вариантов формы инденторов. Преобразуя формулу (1), получим

$$\sigma_{\max} - \sigma_m = \frac{1}{3} \cdot k \cdot E \times \times \ln \left\{ \frac{Q_1}{Q_j} \cdot \frac{\Delta p_j}{\Delta p_1} \cdot \left(\ln \frac{R_1}{R_2} \right)_1 / \left(\ln \frac{R_1}{R_2} \right)_j \right\}, \quad (2)$$

где величина $B = \frac{Q_1}{Q_j} \cdot \frac{\Delta p_j}{\Delta p_1} \cdot \left(\ln \frac{R_1}{R_2} \right)_1 / \left(\ln \frac{R_1}{R_2} \right)_j$ может быть названа общим коэффициентом подобия.

Значение σ_m может быть определено как

$$\sigma_m = \frac{E}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где ε – относительная деформация, которая в данном эксперименте может быть определена как

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h}, \quad (4)$$

где h – толщина резиновой прокладки, $h = 4$ мм.

Тогда, используя экспериментальные значения перепадов давлений и соответствующих утечек из рис. 3–5, а также принимая $k = 0,05$, получим экспериментальное отношение $\sigma_{\max}/\sigma_m$. Все результаты этих вычислений сведены в табл. 2.

Зависимость экспериментального отношения $\sigma_{\max}/\sigma_m$ от внедрения индентора для вариантов 2 и 3 приведена на рис. 7.

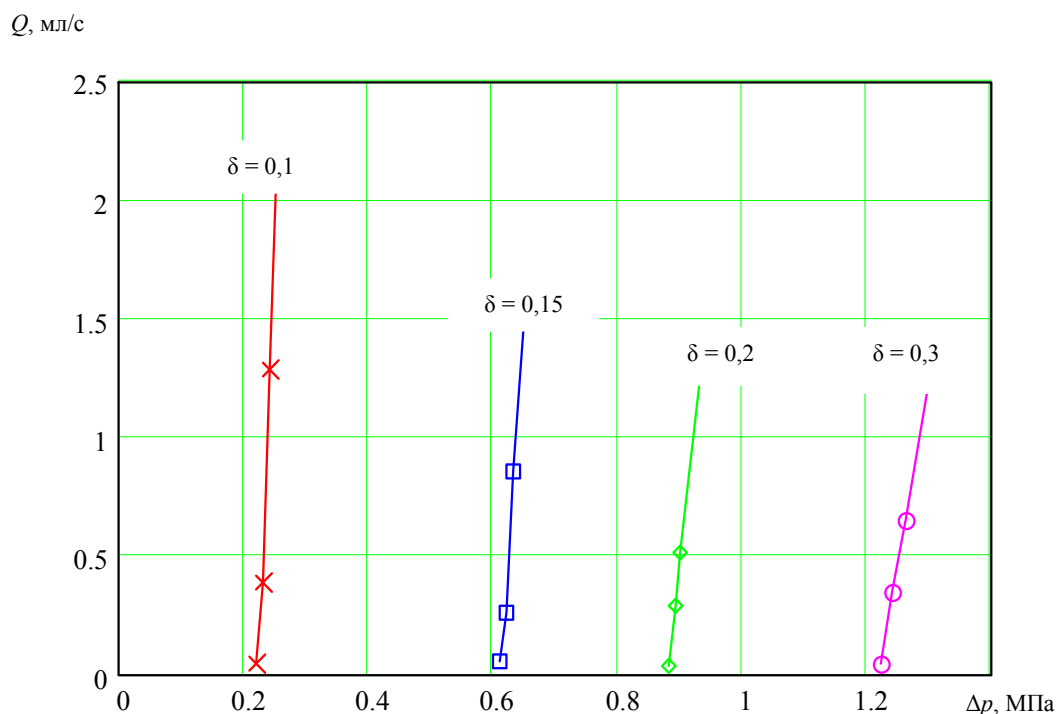


Рис. 3. Зависимость утечек от перепада давлений при различных внедрениях δ в резину индентора, изготовленного по варианту 1

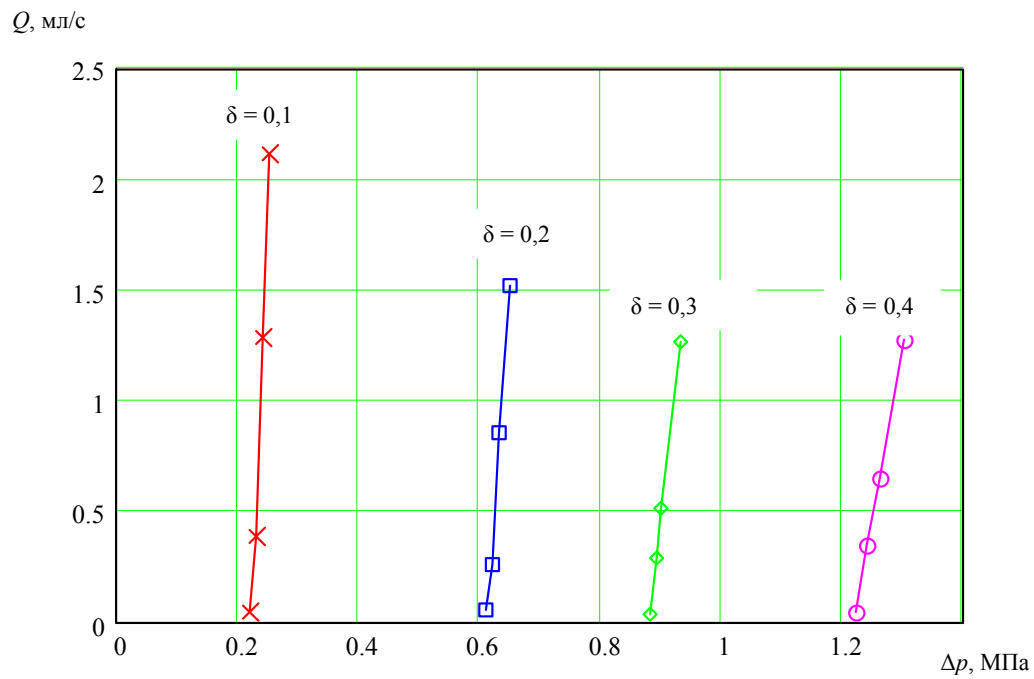


Рис. 4. Зависимость утечек от перепада давлений при различных внедрениях δ в резину индентора, изготовленного по варианту 2

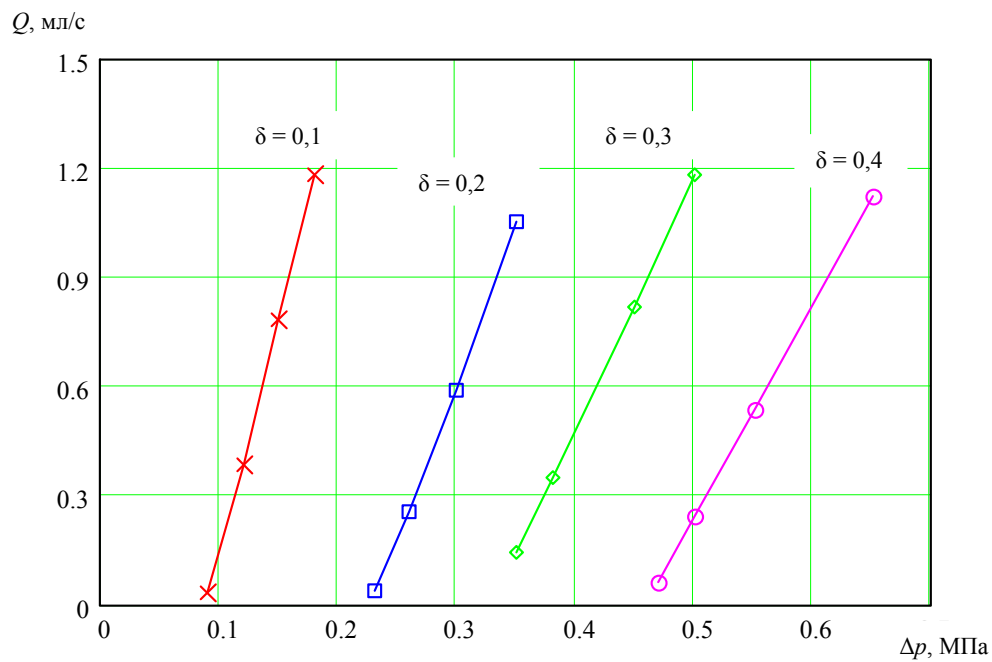


Рис. 5. Зависимость утечек от перепада давлений при различных внедрениях δ в резину индентора, изготовленного по варианту 3

Таблица 1

Результаты вычислений геометрического коэффициента подобия

δ , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	R_1/R_2	$\ln R_1/R_2$	$\left(\ln \frac{R_1}{R_2}\right)_1 / \left(\ln \frac{R_1}{R_2}\right)_j$
1 вариант					
0,1	13,72	12,08	1,1358	0,12646	1
0,2	13,77	12,03	1,1446	0,13506	1
0,3	13,80	12,00	1,1500	0,13977	1
0,4	13,80	12,00	1,1500	0,13977	1

Окончание табл. 1

δ , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	R_1/R_2	$\ln R_1/R_2$	$\left(\ln \frac{R_1}{R_2}\right)_1 / \left(\ln \frac{R_1}{R_2}\right)_j$
2 вариант					
0,1	13,20	12,60	1,0476	0,04650	2,72
0,2	13,30	12,50	1,0640	0,06204	2,17
0,3	13,50	12,30	1,0976	0,09313	1,50
0,4	13,60	12,20	1,1148	0,10868	1,29
3 вариант					
0,1	13,06	12,74	1,0251	0,02479	5,10
0,2	13,10	12,70	1,0315	0,03101	4,37
0,3	13,10	12,70	1,0315	0,03101	4,50
0,4	13,10	12,70	1,0315	0,03101	4,50

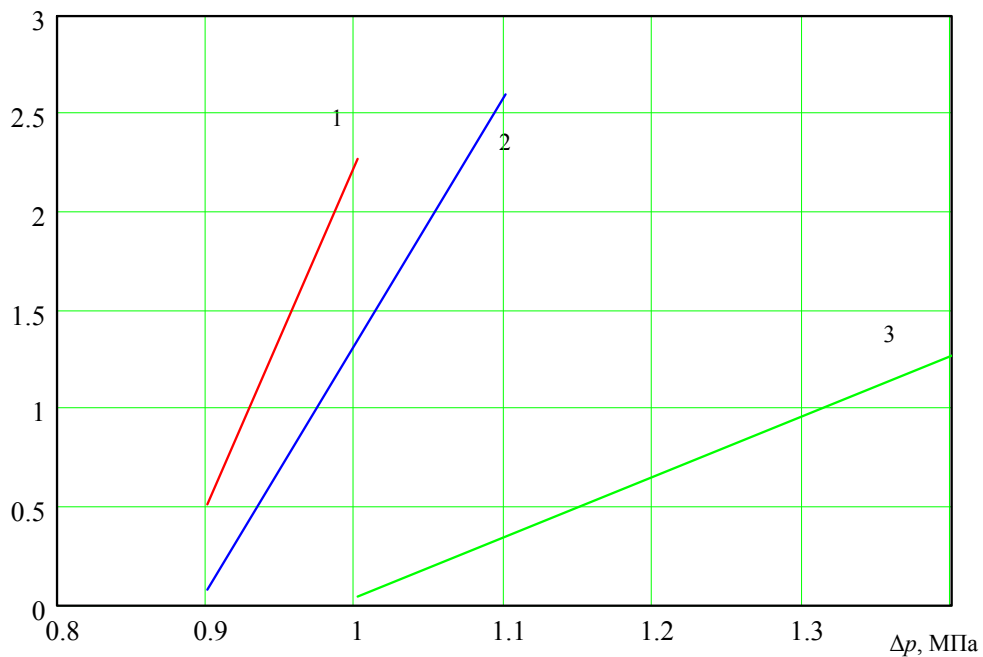
 Q , мл/сРис. 6. Зависимость утечек от перепада давлений с учетом геометрического подобия при внедрении $\delta = 0,2$ в резину индентора, изготовленного по вариантам 1–3

Таблица 2

Результаты вычислений экспериментального отношения $\sigma_{\max}/\sigma_m$

δ , мм	Q_1 , мл/с	Q_j , мл/с	Δp_1 , МПа	Δp_j , МПа	B	ϵ	σ_m , МПа	$\sigma_{\max}$, МПа	$\sigma_{\max}/\sigma_m$
При сравнении второго варианта с базовым (первым)									
0,1	1,280	0,640	0,24	0,18	4,08	0,025	0,08	0,155	1,93
0,2	1,260	0,540	0,93	0,44	2,40	0,050	0,16	0,207	1,29
0,3	1,270	0,724	1,30	0,88	1,78	0,075	0,24	0,271	1,13
При сравнении третьего варианта с базовым (первым)									
0,1	1,280	0,780	0,24	0,15	5,10	0,025	0,08	0,168	2,10
0,2	1,260	0,588	0,93	0,30	4,37	0,050	0,16	0,218	1,36
0,3	1,270	0,820	1,30	0,45	4,50	0,075	0,24	0,287	1,20

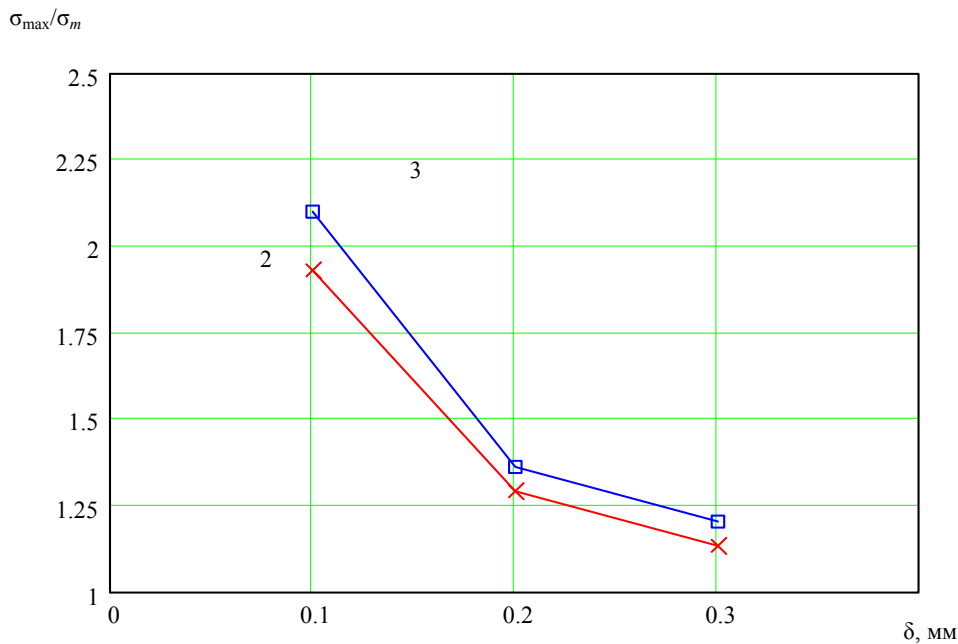


Рис. 7. Экспериментальная зависимость отношения $\sigma_{\max}/\sigma_m$ от внедрения выступа, изготовленного по вариантам 2 и 3, в резину

Использование метода конечных элементов.

Разработанные конечно-элементные модели трех используемых в эксперименте уплотнений с различными формами инденторов и использование программы STAR позволили теоретически изучить распределение напряжений по ширине площадки контакта. Эпюры нормальных напряжений по ширине площадки контакта для первого варианта индентора приведены на рис. 8.

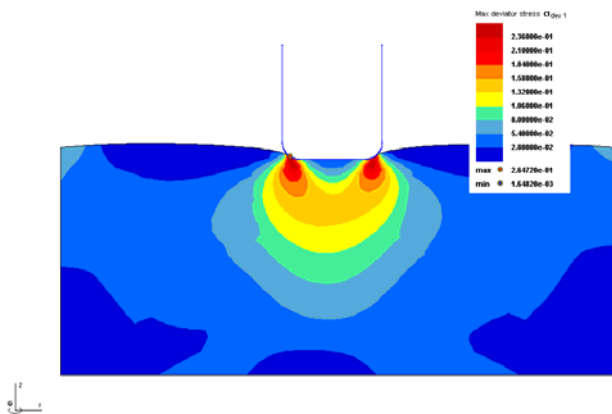


Рис. 8. Поля напряжений при внедрении индентора 1 в резину

Результатом этой экспериментально-теоретической работы явилось создание новой конечно-элементной программы для расчета утечек через неподвижные резиновые уплотнения LEAKAGES [14; 15], учитывающей форму резиновых прокладок, вязкоупругие свойства резины, а также явления релаксации и пол-

зучести. Внешний вид окна программы LEAKAGES после расчета утечек для варианта 1 приведен на рис. 9.

Configuration 1					
p	T	0.1000	0.2000	0.3000	0.4000
	E	3.2000	3.2000	3.2000	3.2000
0.7000	L=0.1920	L=1.5000	L=1.6690	L=1.7870	
	S=1.0900	S=1.1450	S=1.6600	S=2.1630	
	Q=19.241	Q=2.3392	Q=1.2972	Q=0.7560	
0.5500	L=0.3110	L=1.5140	L=1.6600	L=1.7750	
	S=1.0720	S=1.1330	S=1.6460	S=2.1420	
	Q=8.2471	Q=1.5999	Q=0.9021	Q=0.5299	
0.4000	L=0.6480	L=1.5610	L=1.7170	L=1.8410	
	S=0.7390	S=1.1120	S=1.6150	S=2.1010	
	Q=3.4174	Q=1.0000	Q=0.5673	Q=0.3355	
0.2500	L=1.4200	L=1.5540	L=1.7160	L=1.8360	
	S=0.5680	S=1.1000	S=1.5980	S=2.0760	
	Q=0.9941	Q=0.5516	Q=0.3132	Q=0.1870	
0.1000	L=1.4200	L=1.6110	L=1.7170	L=1.8480	
	S=0.5590	S=1.0820	S=1.5790	S=2.0500	
	Q=0.3484	Q=0.1881	Q=0.1107	Q=0.0662	

Рис. 9. Внешний вид окна программы STAR после расчета утечек для варианта 1

Заключение. Таким образом, в результате экспериментальных исследований по внедрению кольцевых инденторов различных профилей в резиновую неподвижную прокладку установлено, что за счет оптимизации формы индентора величина утечек может быть снижена в 10 раз. Разработана конечно-элементная программа для расчета утечек, которая позволяет оптимизировать форму вновь создаваемых резиновых уплотнений для ракетно-космической техники.

Библиографические ссылки

1. Конструкции торцевых уплотнений для вращающихся валов центробежных насосов систем заправки ракет / Кириллов Н. П. [и др.] // Вестник МАДИ. 2012. № 1. С. 18–22.
2. Голубев А. И., Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника : справочник. М. : Машиностроение, 1986. 464 с.
3. Лазарев С. О., Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Исследование влияния распределения напряжений в зоне контакта на утечки через резиновое уплотнение в неподвижном соединении // Материалы X Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. С. 311–312.
4. Ашейчик А. А., Чулкин С. Г. Экспериментальная механика : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 107 с.
5. Ашейчик А. А., Полонский В. Л., Чулкин С. Г. Вычислительная механика. Расчет деталей машин методом конечных элементов : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 301 с.
6. Ашейчик А. А. Детали машин и основы конструирования. Справочные материалы : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2014. 111 с.
7. Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Прогнозирование изменения физико-механических свойств эластомеров при термическом старении // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 265–272.
8. Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Определение энергии активации эластомеров экспериментально-теоретическим методом // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 283–291.
9. Образцов И. Ф., Савельев Л. М., Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М. : Высш. шк., 1985. 392 с.
10. Чулкин С. Г., Ашейчик А. А., Селин С. Н. Применение подшипников из углепластиков в судостроении, турбиностроении, горнодобывающей технике // Современное машиностроение. Наука и образование : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 805–816.
11. Ашейчик А. А., Чувакова М. К. Исследование динамического модуля и модуля внутреннего трения эластомеров // XLIII Неделя науки СПбПУ : материалы Междунар. конф. (1–5 дек. 2014). СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 70–73.
12. Бартенев Г. М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. М. : Химия, 1979. 287 с.
13. Ашейчик А. А., Полонский В. Л. Экспериментальное исследование эластомеров и полимеров для нефтяной промышленности. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. 236 с.
14. Лазарев С. О., Полонский В. Л., Ашейчик А. А. Вычислительная механика : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. Ч 2. 122 с.

15. Design simulation of twisted cord-rubber structure using proe/ANSYS / R. M. Pidaparti [et al.] // Composite Structures. 2001. Vol. 52, no 3–4. Pp. 287–294.

References

1. Kirillov N. P., Burenin V. V., Polyanskiy V. I., Dragun D. K. [The designs of face seals for torsion shaft of centrifugal pumps of systems of refuelling of rockets]. *Vestnik MADI*. 2012, No. 1, P. 18–12 (In Russ.).
2. Golubev A. I., Kondakov L. A. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik*. [Seal and seal equipment: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 464 p.
3. Lazarev S. O., Asheichik A. A., Polonskii V. L. [Research of influence of stress distribution in a contact zone on leaks through rubber seal in fixed connection]. *Materialy X Vserossiiskoi konferentsii po problemam nauki i vysshei shkoly*. [Proceedings of X All-Russian Conference on Science and Higher Education]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2006, P. 311–312 (In Russ.).
4. Asheichik A. A., Chulkin S. G. *Eksperimental'naya mekhanika*. [The experimental mechanics]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2008, 107 p.
5. Asheichik A. A., Polonskii V. L., Chulkin S. G. *Vychislitel'naya mekhanika. Raschet detalei mashin metodom konechnykh elementov*. [The computing mechanics. Calculation of machine elements by a finite elements method]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2011, 301 p. (In Russ.).
6. Asheichik A. A. *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya. Spravochnye materialy* [The machine elements and base of design: background materials]. St.-Petersburg. St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2014, 111 p. (In Russ.).
7. Asheichik A. A., Polonskii V. L. [The prediction of change of physic-mechanical properties of elastomers at thermal ageing]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2013, P. 265–272 (In Russ.).
8. Asheichik A. A., Polonskii V. L. [The definition of energy of activation of elastomers an experimentally-theoretical method]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2014, P. 283–291 (In Russ.).
9. Obratsov I. F., Savel'ev L. M., Khazanov Kh. S. *Metod konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki letatel'nykh apparatov* [The finite element analysis in problems of building mechanics of flying machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 392 p. (In Russ.).
10. Chulkin S. G., Asheichik A. A., Selin S. N. [Application of carbon fibre bearings in shipbuilding, turbine

building, the mining equipment]. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie: materialy mezhdunar. nauchn.-prakt. konferentsii*. [Modern mechanical engineering. Science and education: materials of the international scientifically-practical conference]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2012, P. 805–816 (In Russ.).

11. Asheichik A. A., Chuvakova M. K. [Research of the dynamic module and the module of an internal friction of elastomers]. *XLIII Nedelya nauki SPbPU: materialy mezhdunarodnoi konferentsii 1–5 dekabrya 2014*. [XLIII Science week of SPbPU: materials of international conference 2–7 December 2013 year]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2015, P. 70–73 (In Russ.).

12. Bartenev G. M. *Struktura i relaksatsionnye svoistva elastomerov*. [Structure and relax properties of elastomers]. Moscow, Khimiya Publ., 1979, 287 p. (In Russ.).

13. Asheichik A. A., Polonskii V. L. *Eksperimental'noe issledovanie elastomerov i polimerov dlya neftyanoi promyshlennosti*. [Experimental research of elastomers and polymers for petroleum industry]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2015, 236 p. (In Russ.).

14. Lazarev S. O., Polonskii V. L., Asheichik A. A. *Vychislitel'naya mekhanika. Ch. 2* [The computing mechanics. Part 2]. St.-Petersburg, St.-Petersburg polytechnical university Publ., 2007, 122 p. (In Russ.).

15. Pidaparti R. M., Jayanti S., Henkle J., El-Mounayri H. Design simulation of twisted cord-rubber structure using proe/ANSYS. *Composite Structures*, 2001, Vol. 52, No. 3–4, P. 287–294.

© Ашейчик А. А., Полонский В. Л., 2015

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ
СОВМЕЩЕННЫМ СПОСОБОМ ЛИТЬЯ И ШТАМПОВКИ**С. Л. Бусыгин^{1*}, А. М. Токмин¹, В. В. Богданов², С. А. Готовко^{1,2}¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: politex_1999@bk.ru

Описаны основные функции, которые выполняют электроды контактной сварки, а также области, в которых они применяются (машиностроение, автомобилестроение, ракетно-космическая промышленность, строительство). Применительно к ракетно-космической промышленности электроды используют для получения соединений элементов конструкций летательных аппаратов (соединение обшивки с элементами каркаса и соединение элементов каркаса контактной сваркой). Оценена сложность способов изготовления электродов контактной сварки с заданным комплексом физико-механических свойств, а также сложность управления макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками, изменением структурно-энергетического состояния сплава. Описан способ ввода легирующих элементов в приготовленный расплав с помощью таблетки Си–Сг. Отработана на практике технология плавки и последующей штамповки электродов. Определены режимы последующих термических операций после штамповки электродов контактной сварки для достижения наиболее высокого уровня физико-механических свойств (твердость и электропроводность). Исследована микроструктура образца электрода на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Vision, показывающая достаточно равномерное распределение вторичной фазы в объеме электрода. Проведен энергодисперсионный анализ образцов электродов на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F, показывающий примерное содержание основных элементов в сплаве, а также распределение химических элементов в характеристическом излучении по площади шлифа, что в большой степени влияет на твердость и электропроводность электродов контактной сварки. Проведены испытания полученных образцов электродов на машине контактной сварки МПТУ-300, оценено их качество. В результате практических испытаний были подобраны оптимальные режимы контактной сварки стержней арматуры в крест из стали 35ГС диаметрами 10 + 40 мм. Оценено влияние наноструктурированных частиц хрома на твердость, электропроводность и стойкость электродов контактной сварки. Построены зависимости степени износа электродов от количества сваренных точек для различных материалов, применяемых при изготовлении электродов контактной сварки. Сформулированы выводы по результатам проделанной работы.

Ключевые слова: литье, штамповка, наноструктурированные частицы, контактная сварка, твердость, электропроводность, стойкость.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 714–719**A METHOD OF RESISTANCE WELDING ELECTRODES MANUFACTURING
BY COMBINED CASTING AND STAMPING**S. L. Busygin^{1*}, A. M. Tokmin¹, V. V. Bogdanov², S. A. Gotovko^{1,2}¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State Aerospace University

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: politex_1999@bk.ru

The present article describes the main functions of the resistance welding electrodes, as well as areas in which they are applied (engineering, automotive, aerospace industry, construction). With regard to the aerospace industry, the electrodes are used to obtain the compounds of an aircraft structural elements (connection of sheathing with framing members and connecting elements of the frame by resistance welding). Assessed is the complexity of the processes used in the manufacturing of resistance welding electrodes with a given set of physical-mechanical properties, as well as the complexity of managing the macro - and microstructure, strength and operational characteristics, changes in the structural

and energetic state of the alloy. The method of introduction of alloying elements prepared in the melt by using tablets Cu-Cr is described. The technology of smelting and further pressing of the electrodes is tested. A subsequent heat treatment after forming the electrodes of resistance welding to achieve the highest level of physical and mechanical properties (hardness and conductivity) is defined. Investigated is the microstructure of the sample electrode in the optical microscope Carl Zeiss Axio Vision, showing a fairly uniform distribution of secondary phases in the bulk electrode. Energy dispersive analysis of samples of electrodes on a scanning electron microscope JEOL JSM-7001F was conducted, showing the approximate contents of the main elements in the alloy, as well as the distribution of chemical elements in characteristic radiation on the surface of a cone that has a considerable influence on the hardness and conductivity of the electrodes of resistance welding. The tests of the samples of the electrodes in resistance welding machine, MPTU-300, assessed their quality. As a result of practical tests of the optimal modes of contact welding of bar reinforcement cross of steel 35GS diameters 10+40 mm are chosen. The influence of nanostructured particles of chromium on the hardness, electrical conductivity and resistance of the electrodes of resistance welding is estimated. The dependences of the degree of wear of the electrodes from the number of welded points for various materials used in the manufacture of resistance welding electrodes are formed. Conclusions according to the results of the work are done.

Keywords: Casting, stamping, nanostructured particles, welding, hardness, conductivity, resistance.

Введение. Одним из наиболее распространенных способов сварки в различных отраслях техники является контактная сварка. Основные сферы ее применения – машиностроение, автомобилестроение, ракетно-космическая промышленность, строительство и др. Применительно к ракетно-космической промышленности электроды используют для получения соединений элементов конструкций летательных аппаратов (соединение обшивки с элементами каркаса и соединение элементов каркаса контактной сваркой). Электроды контактной сварки являются основным инструментом, технически осуществляющим процесс образования сварной точки. Они выполняют функцию проводников электрического тока и являются силовыми элементами, передающими значительные усилия в процессе сжатия. Электроды одновременно являются элементами вторичного контура трансформатора, силовыми конструктивными элементами контактной машины и сменным технологическим инструментом. В процессе эксплуатации рабочая часть электродов испытывает высокую токовую нагрузку, высокие градиенты температур, циклические напряжения и упруго-пластические деформации сжатия, сдвига и изгиба. Кроме того, на рабочей поверхности действуют силы трения, качения и скольжения [1–3].

Создание металлических материалов с заданным комплексом физико-механических свойств может быть реализовано с применением комплексного подхода, сочетающего получение заданного химического состава, технологию получения и упрочняющую обработку, обеспечивающие получение требуемого фазового состава и определенного структурного состояния монолитных и порошковых материалов. Свойства сплавов определяются не только химическим составом и микроструктурой, но и в значительной степени типом, размерами, формой и характером распределения фаз различной природы и происхождения.

Применение различных технологий позволяет управлять макро- и микроструктурой, прочностными и эксплуатационными характеристиками, изменяя структурно-энергетическое состояние сплава. Современное представление об эффективном управлении свойствами материалов основывается на возможности создания условий, при которых происходит самоорганизация заданного структурно-фазового состояния [4; 5].

Технологии, используемые в настоящее время для получения медно-хромовых сплавов и дисперсно-упрочненных композиционных материалов, требуют сложных в обслуживании и в то же время дорогих плавильных агрегатов. Авторами разработан ресурсосберегающий способ приготовления [6; 7] хромовых бронз и получения электродов контактной сварки на специализированной установке (рис. 1) совмещенным способом литья и штамповки [8], что позволяет перерабатывать вторичное сырье, технологически упростить и экономически удешевить процесс изготовления электродов [9].



Рис. 1. Специализированная установка для получения электродов контактной сварки

Технология плавки. Для получения медного сплава использовались отходы медного лома типа А 1/1 по ГОСТ 1639–93. Масса загружаемого в графитовый тигель индукционной печи металла составляла 1 кг. Плавку осуществляли под слоем древесного угля, толщина слоя 25–30 мм, при рабочей частоте печи 44 ± 4 кГц. Медный расплав раскисляли фосфором, который добавляли в виде лигатуры МФ 9 по ГОСТ 4515–93 в количестве 0,7 % [10]. Затем в раскисленный расплав вводили легирующий элемент в виде

таблетки (рис. 2), состоящей из 83 % медного порошка марки ПМС-1 по ГОСТ 4960–75 и 17 % наноструктурированных частиц хрома Х99 по ГОСТ 5905–79.

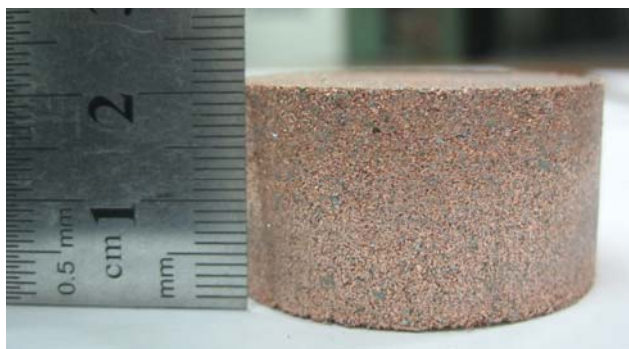


Рис. 2. Легирующий элемент в виде таблетки

Перемешивание жидкого металла происходило под действием переменного электромагнитного поля. Это дает возможность получить в индукционной печи однородный по химическому составу сплав [11].

Технология получения электродов. Заливку расплавленного металла осуществляли в матрицу технологической оснастки (рис. 3). После остывания сплава до температуры 850–900 °С штамповали (рис. 4) пуансоном охлаждающий канал в электроде, затем открывали подвижным клином дно матрицы и проталкивали электрод пуансоном в охлаждающую камеру, находящуюся в основании прессы, для закалки в проточной воде [12; 13]. Полученный образец электрода представлен на рис. 5.



Рис. 3. Заливка металла в матрицу

Старение электродов осуществляли в муфельной печи СНОЛ-1.62.5.1/11-ИЗ при температуре 450 °С в течение 4 ч, при этом достигается наиболее высокий уровень физико-механических свойств (твердость и электропроводность) [14].

Исследование микроструктуры в композиционном контрасте с картированием и точечными спектрами. Исследование микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vision, оснащенного устройством визуализации изображения.



Рис. 4. Штамповка охлаждающего канала



Рис. 5. Образец полученного электрода

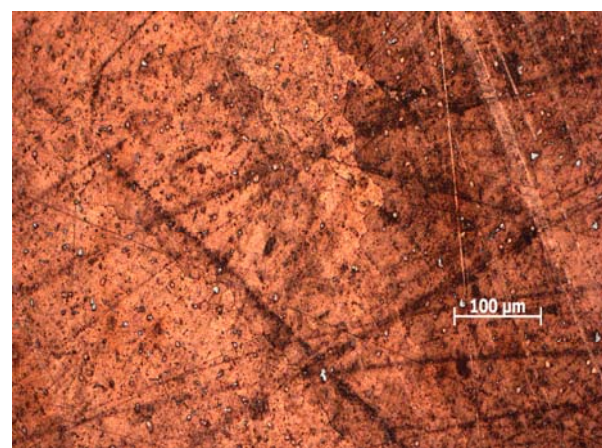


Рис. 6. Микроструктура электрода, полученного по совмещенной технологии литья и штамповки, после термической обработки

Следует отметить достаточно равномерное распределение вторичной фазы в объеме электрода (рис. 6). Это свидетельствует об интенсивном перемешивании расплава в процессе индукционной плавки сплава.

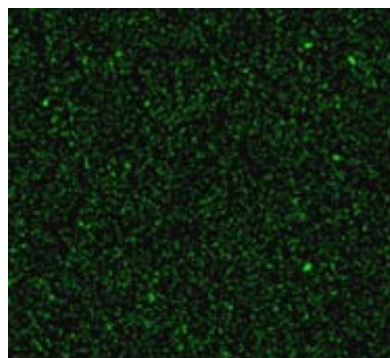
Энергодисперсионный анализ выполняли на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F. Суммарная площадь исследования составила около 5 мм² и показывает примерное содержание основных элементов в сплаве (табл. 1).

Таблица 1

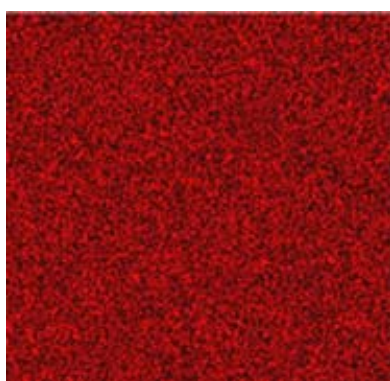
Содержание основных элементов в сплаве

Содержание химических элементов в спектре			
Cr, %	P, %	Cu, %	Total, %
1,01	0,12	98,87	100

Распределение химических элементов в характеристическом излучении по площади шлифа (рис. 7) достаточно равномерное, что положительно отражается на твердости и электропроводности образцов.



a



б

Рис. 7. Карты химических элементов в характеристическом излучении (x3000):
a – Cr (хром); *б* – Cu (медь)

Испытания образцов электродов. Качество электродов контактной сварки определяется их стойкостью, т. е. способностью сохранять в определенных пределах исходные размеры и форму рабочей поверхности. В конечном счете, от формы и размеров рабочей части электродов зависит качество сварного соединения [15].

Чтобы исключить влияние как можно большего количества факторов и обеспечить требуемую объективность оценки работоспособности электродов, испытания проводили на одной сварочной машине, сваривая материал одной марки разной толщины и качества поверхности, задаваясь при этом вполне определенными параметрами сварки (температура сварки, энергетические параметры, давление на электроды, условия охлаждения).

Испытание проводили на контактной машине МПТУ-300. Сваривали в крест стержни арматуры (рис. 8) диаметрами 10 + 40 мм из стали 35ГС.



a



б



в

Рис. 8. Сварка арматуры в крест:
a – сжатие стержней; *б* – сварка стержней;
в – стержни после сварки

В результате сварки арматуры в крест были подобраны оптимальные режимы, приведенные в табл. 2.

Испытания проводили до полного износа электродов (рис. 9).

На графике зависимости степени износа электродов от количества точек (рис. 10) видно, что полученные электроды изнашиваются на 50–70 % меньше, чем электроды из аналогичных сплавов, а следовательно, дольше работают до полного износа, что в значительной мере снижает конечную стоимость продукции.

Таблица 2

Режимы сварки в крест двух стержней арматуры из стали 35ГС диаметрами 10 + 40 мм

Усилие на электродах, кг	Сварочный ток, кА	Темп сварки, т/мин	Время сварки, с	Длительность выдержки под током, с
580	23,6	30	0,25–0,72	0,47



Рис. 9. Полный износ электрода

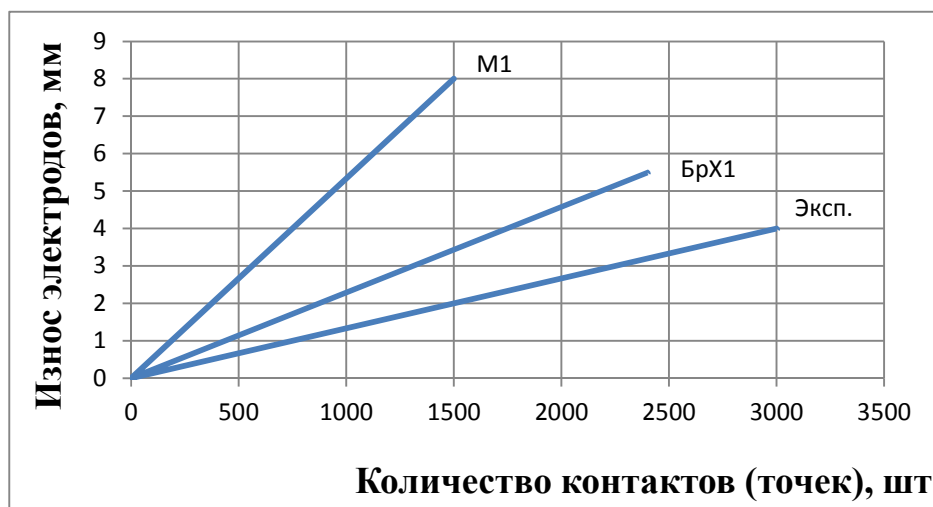


Рис. 10. График зависимости степени износа электродов от количества точек

Закключение. Результаты выполненной работы дают основание сделать следующие выводы:

1. Применение медных таблеток с содержанием наноструктурированных частиц хрома позволяет получить нужный по химическому составу сплав и исключить сложные, дорогостоящие операции приготовления лигатуры Cu–Cr.

2. Предложенная методика плавки обеспечивает равномерное распределение хрома в сплаве, что положительно отражается на прочностных и электропроводных свойствах электродов.

3. Использование совмещенного способа литья и штамповки, а также операций по термообработке, позволяет получать электроды, по твердости, электропроводности и стойкости превосходящие электроды из аналогичных сплавов, полученных по традиционной технологии.

4. Применяемая ресурсосберегающая технология позволяет получать электроды контактной сварки из вторичного сырья, что в значительной мере снижает конечную стоимость продукции.

Библиографические ссылки

1. Применение ресурсосберегающей технологии металлургической переработки меди и медных сплавов для получения электродов контактной сварки /

С. Л. Бусыгин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (32). С. 119–121.

2. Повышение работоспособности электродов при точечной контактной сварке сталей / Г. А. Меньшиков [и др.] // Сварочное производство. 2008. № 10. С. 32–35.

3. Пат. 7355142 Соединенные Штаты Америки, В 23 К 11/30, В 23 К 2201/38. Термостойкий сварочный электрод для сварки гибкого медного отведения и способ его изготовления / Джереми М. Будаи ; заявитель корпорация Линкольн Глобал, Калифорния. № 20060237396 А1 ; заявл. 22.04.2005 ; опубл. 08.04.2008.

4. Бусыгин С. Л., Синичкин А. М., Токмин А. М. Получение электродов контактной сварки совмещенным способом литья и штамповки // Металлургия машиностроения. 2013. Вып. № 2. С. 39–43.

5. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова [и др.]. М. : Наука, 1994. 382 с.

6. Пат. 2412035 Российская Федерация, В 23 К 35/40, В 23 К 11/30. Способ изготовления электродов для контактной сварки / Бусыгин С. Л., Демченко А. И., Рафальский А. С. № 2010108888/02 ; заявл. 09.03.2010 ; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5. 5 с.

7. Восстановление электродов рельефной сварки / А. П. Рукоусев [и др.] // Вестник КГТУ. 2005. № 40. С. 11–15.

8. Установка для литья электродов контактных машин / А. П. Рукосуев [и др.] // Вестник КГТУ. 2006. № 41. С. 184–191.

9. Рукосуев А. П., Бусыгин С. Л., Ли И. В. Изготовление электродов для электроконтактных машин из утилизированной меди и ее сплавов // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика : сб. науч. тр. / под ред. В. В. Стацеры ; ГУЦМиЗ. 2005. № 11. С. 57–58.

10. Ватрушин Л. С., Осинцев В. Г., Козырев А. С. Бескислородная медь. М. : Metallurgiya, 1982. 192 с.

11. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М. : Metallurgiya, 1968. 496 с.

12. Установка для штамповки электродов рельефной сварки / А. П. Рукосуев [и др.] // Проблемы машиностроения и новые материалы (Борисовские чтения) : материалы Всерос. науч.-техн. конф. с международ. участием / ред. Е. Г. Синенко. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. С. 65–67.

13. Устройство для формирования посадочной части электродов контактной сварки / С. Л. Бусыгин [и др.] // Вестник Ассоциации выпускников КГТУ. 2011. № 20. С. 149–151.

14. Николаев А. К., Новиков А. И., Розенберг В. М. Хромовые бронзы. М. : Metallurgiya, 1983. 176 с.

15. Николаев А. К., Розенберг В. М. Сплавы для электродов контактной сварки. М. : Metallurgiya, 1978. 96 с.

References

1. Busygin S. L., Rukosuev A. P., Krushatina S. K., Demchenko A. I., Rafalsky A. S. [The use of resource-saving technologies of metallurgical processing of copper and copper alloys to obtain electrodes of resistance welding]. *Vestnik SibGAU*. 2010, No. 6 (32), P. 119–121 (In Russ.).

2. Menshikov G. A., Vlasenko A. N., Nevrovsky V. A., Vasin V. A. [Improving the performance of the electrodes in resistance spot welding steels]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2008, No. 10, P. 32–35 (In Russ.).

3. Jeremie M. Buday, Lincoln Global, Inc. California [Resistance welding electrode, welded copper flex lead, and method for making same]. Patent US, no. 7355142, 2008.

4. Busygin S. L., Sinichkin A. M., Tokmin A. M. [Getting contact welding electrodes combined casting and stamping]. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2013, No. 2, P. 39–43 (In Russ.).

5. Ivanova V. S., Balankin A. S., Bunin I. W., Okso-goev A. A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii*.

[Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 382 p.

6. Busygin S. L., Demchenko A. I., Rafalsky A. S. *Sposob izgotovleniya elektrodov dlya kontaktnoy svarki* [A method of manufacturing electrodes for resistance welding]. Patent RF, no. 2412035, 2011.

7. Rukosuev A. P., Busygin S. L., Chubinet V. M., Antonenko O. Yu. [The restoration of projection welding electrodes]. *Vestnik KGTU*. 2005, No. 40, P. 11–15 (In Russ.).

8. Rukosuev A. P., Busygin S. L., Sinichkin A. M., Novitskiy R. N. [Installation for casting electrodes resistance machines]. *Vestnik KGTU*. 2006, No. 41, P. 184–191 (In Russ.).

9. Rukosuev A. P., Busygin S. L., Lee I. V. [The manufacture of electrodes for electric cars out of recycled copper and its alloys]. *GUTsMiZ, Krasnoyarsk*. 2005, No. 11, P. 57–58 (In Russ.).

10. Vatrushin L. S., Osintcev V. G., Kozыrev A. S. *Beskislородnaya мед'*. [Oxygen-free copper]. Moscow, Metallurgy Publ., 1982, 192 p.

11. Farbman S. A., Kolobnev I. F. *Induktsionnye pechi dlya plavki metallov i splovov* [Induction furnace for melting of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya, Publ., 1968, 496 p.

12. Rukosuev A. P., Busygin S. L., Novitskiy R. N., Veretennikov S. A. [Installation for stamping projection welding electrodes]. *Problemy mashinostroeniya i novye materialy (Borisovskie chteniya): materialy vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. [Problems of mechanical engineering and new materials (Borisov reading): Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation]. Krasnoyarsk, IPTs KGTU Publ., 2006, P. 65–67 (In Russ.).

13. Busygin S. L., Charolsky E. M., Rukosuev A. P., Karagaeva S. K. [Apparatus for forming a landing portion of the resistance welding electrodes]. *Vestnik Assotsiatsii vypusknikov KGTU*. 2011, No. 20, P. 149–151 (In Russ.).

14. Nikolaev A. K., Novikov A. I., Rozenberg V. M. *Khromovye bronzy* [Chrome bronze]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983, 176 p.

15. Nikolaev A. K., Rozenberg V. M. *Splavy dlya elektrodov kontaktnoy svarki*. [Alloys for resistance welding electrodes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 96 p.

© Бусыгин С. Л., Токмин А. М., Богданов В. В., Готовко С. А., 2015

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ КАРДАННЫХ ШАРНИРОВ
НЕРАВНЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

С. П. Ереско*, Т. Т. Ереско, Е. В. Кукушкин, В. А. Меновщиков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: eresko07@mail.ru

Приведен обзор конструкций карданных шарниров неравных угловых скоростей, таких как шарниры с разрезной втулкой и шарнир с витой цилиндрической пружиной из проволоки круглого сечения, шарнир с витой цилиндрической пружиной из проволоки, сечение которой имеет форму выпуклого многоугольника, шарнир с втулками из материала высокой твердости, шарнир с несколькими втулками, шарнир с разборным корпусом. Рассмотрено влияние угла перекоса роликов игольчатого подшипника на величину контактных напряжений и выполнен сравнительный анализ конструкций карданных шарниров на игольчатых подшипниках для применения в транспортно-технологических системах. Проведенный патентный поиск выявил ряд способов и устройств, направленных на решение проблемы выхода из строя подшипниковых узлов на игольчатых подшипниках. Рассмотрены карданные шарниры с разрезными втулками, карданные шарниры с витой цилиндрической пружиной из проволоки круглого сечения и с витой цилиндрической пружиной из проволоки, сечение которой имеет форму выпуклого многоугольника, карданные шарниры с втулками из материала высокой твердости и несколькими втулками, карданные шарниры с разборным корпусом крестовины. Предложены усовершенствованные конструкции карданных шарниров неравных угловых скоростей. Карданный шарнир со сменными шипами крестовины обеспечивает возможность замены частей карданного шарнира без демонтажа всей карданной передачи и включает в себя корпус крестовины, в который установлены шипы в виде втулок. Карданный шарнир с новым уплотнением позволяет исключить попадание инородных тел в рабочую полость карданного шарнира и утечку смазочного материала, а также повысить надежность карданных шарниров за счет герметизации рабочей полости. Уплотнение выполнено в виде гофрированной трубы, имеющей форму усеченного конуса, заканчивающегося со стороны большего основания коаксиальной шайбой L-образного сечения, а со стороны меньшего основания – кольцом в форме тора, зафиксированном в ответной торообразной проточке.

Ключевые слова: усталостные разрушения, карданный шарнир, игольчатые подшипники, современные представления исследований, контактная прочность, контактные напряжения.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 720–728**COMPARATIVE ANALYSIS OF UNIVERSAL JOINT STRUCTURES
OF UNEQUAL ANGULAR VELOCITY**

S. P. Eresko*, T. T. Eresko, E. V. Kukushkin, V. A. Menovschikov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: eresko07@mail.ru

Presented is the overview of universal joint designs of unequal angular velocities, such as cutting the hinges with a hinge sleeve and a helical coil spring of wire of circular cross section, a cylindrical hinge with a helical spring made of wire, the cross section of which has the shape of a convex polygon, the hinge sleeves of material with high hardness, the hinge with a few bushes, hinge with folding case. The influence of the skew angle of the needle bearing rollers on the value of the contact stresses and the comparative analysis of universal joints structures on needle bearings for use in transport and technological systems has been studied. Patent search revealed a number of methods and devices aimed at solving the problem of failure of the bearing units on needle bearings. Considered are universal joints with a split bushing, universal joints twisted coil spring wire of circular cross section and twisted coil spring wire cross section which has the shape of a convex polygon, universal joints with sleeves of material with high hardness and a few bushes,

universal joint cross folding case. The improved designs of universal joints of unequal angular velocities are suggested. Universal joint with replaceable spikes provides the possibility of replacing parts of the universal joint without disassembling the entire driveline and includes body crosses, in which there are spikes in the form of sleeves. Universal joint with a new seal allows to prevent foreign bodies in the work space of the universal joint and leakage of lubricant, improve the reliability of universal joints due to the sealing of the working chamber, sealing in the form of a corrugated tube frustoconical ending by the larger base coaxial washer L-shaped cross section, and from the smaller base ring in the shape of a torus, fixed in response toroidal groove formed in the body of the cross at the base of the spike.

Keywords: fatigue failures, universal joint, needle roller bearings, the current understanding of research, the contact resistance, the contact stresses.

Введение. Подшипниковые узлы являются важнейшими структурными элементами машин и составляют основную часть узлов трения. Отказ техники зачастую происходит из-за отказа подшипниковых узлов, которые ограничивают долговечность машин. Даже при достаточно качественном изготовлении деталей подшипниковых узлов, например, игольчатого подшипника качения, характеристики карданной передачи могут оказаться неудовлетворительными, и произойдет внезапный отказ. При этом под отказом следует понимать не обязательно разрушение трущихся (рабочих) поверхностей, а выход одной из характеристик подшипниковых узлов за допускаемые пределы.

Постановка задачи исследования. Задачей исследования является создание новых конструкций карданных шарниров на игольчатых подшипниках, обеспечивающих возможность замены частей карданного шарнира без демонтажа всей карданной передачи; исключение попадания инородных тел в рабочую полость карданного шарнира и утечку смазочного материала, повышение надежности карданных шарниров за счет герметизации рабочей полости новым уплотнением карданного шарнира.

В шарнирах неравных угловых скоростей карданных передач транспортно-технологических машин применяются специальные игольчатые роликоподшипники, «карданные» подшипники, которые работают в режиме колебательного движения под воздействием больших радиальных нагрузок, в условиях вибрации [1].

Малый угол перемещения игольчатых роликов, недостаточность смазки, проникновение пыли в подшипник, иногда пониженная твердость цилиндрической поверхности цапфы, вибрация от разбалансированного карданного вала создают условия для износа поверхности цапф по типу «ложного бринеллирования».

Расчет на контактную прочность роликового игольчатого подшипника проводится в предположении, что тела качения расположены параллельно кольцам. Однако в таких условиях подшипник работает незначительное время в процессе приработки, т. е. до достижения равновесной шероховатости всех сопряженных поверхностей [2]. После приработки появляются зазоры между телами качения и кольцами подшипника.

Анализ исследований изношенных игольчатых подшипников указывает, что одной из основных причин выхода их из строя является образование вмятин

на шипах крестовин [1; 2]. Такие вмятины расположены под углом 2° – 6° к оси шипа, что свидетельствует о перекосе игл в процессе работы.

Отклонение цилиндров от параллельности приводит к изменению формы площадки контакта, она приобретает вид эллипса.

Полуоси эллиптической площадки определим по формулам

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3 \beta_0 P}{2 \chi}}, \quad (1)$$

$$b = n \sqrt[3]{\frac{3 \beta_0 P}{2 \chi}}, \quad (2)$$

где m и n – коэффициенты, зависящие от угла отклонения цилиндров ψ .

Формула для наибольшего давления имеет вид [3]

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi ab}. \quad (3)$$

Определим контактные напряжения в игольчатом подшипнике 804704 шарнира карданного вала автомобиля ГАЗ 5310. Игла и цапфа – стальные цилиндры, радиусы которых $R_1 = 0,00175$ м, $R_2 = 0,011$ м, $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,3$, внешняя нагрузка $P = 2928$ Н, при одинаковой длине площадки контакта $2a = 0,01$ мм, давлении в средней линии $p_0 = 3,02 \cdot 10^9$ Па площадь увеличивается на 18 %.

Далее было смоделировано влияние перекоса иглы на величину максимального давления. Перекос цилиндров от 0° до 6° приводит к увеличению давления в средней линии (рис. 1).

Как видно, при отклонении игл на угол от 0° до 6° происходит увеличение максимального давления, что связано с уменьшением площадки контакта. При отклонении иглы на угол 6° максимальное давление в 1,15 раза больше, чем при контакте цилиндров по образующей.

Точки, испытывающие максимальное давление, расположены в середине площадки контакта, поэтому опасной является именно эта зона [4].

Вычислим интенсивность напряжений в центре эллиптической площадки контакта, когда координаты $x = y = 0$:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}. \quad (4)$$

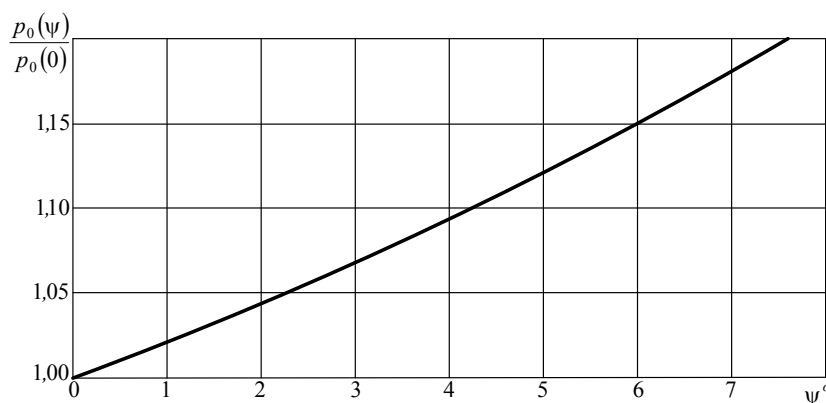


Рис. 1. Изменение максимального давления в центре площадки контакта двух цилиндров в зависимости от угла между образующими ($p_0(0)$ – давление при $\psi = 0^\circ$)



Рис. 2. Изменение интенсивности напряжений в центре площадки контакта двух цилиндров в зависимости от угла между образующими ($\sigma_i(0)$ – интенсивность напряжений при $\psi = 0^\circ$)

Согласно рис. 2, увеличение угла перекоса иглы и цапфы подшипника приводит к росту интенсивности напряжений, при угле 6° – на 14 %. Отклонение иглы от параллельности приводит к увеличению уровня интенсивности контактных напряжений, нежели в ранее принятых методиках расчета, а также снижению долговечности.

Достаточная долговечность отдельных деталей подшипниковых узлов, подтвержденная стендовыми испытаниями, не гарантирует достаточной долговечности всего узла. Последнее обстоятельство связано с тем, что нагрузки, действующие в узле, а также реальная температура могут существенно отличаться от стендовых. Кроме того, сборка и монтаж меняют зазоры, натяги и форму рабочих поверхностей подшипниковых узлов. Особенно отчетливо возникает противоречие между качеством подшипниковых узлов и собственно подшипником, которое проявляется в узлах именно с подшипниками качения [4–7].

Особенность работы игольчатых подшипников карданных передач состоит в том, что иглы совершают колебательное, возвратно-вращательное движение, перекатываясь по цапфе крестовины на небольшом участке, причем дорожки качения двух соседних игл часто не перекрываются. Эта особенность работы игольчатого подшипника кардана и определяет характер разрушения данного узла. К основным видам раз-

рушения поверхностей шипов относится образование канавки и питтинг [1; 2; 8]. В основном причина выхода из строя подшипников заключается в повреждении дорожек канавки шипов, что вызывает необходимость разработки и проектирования новых конструкций карданных шарниров.

Одна из причин образований канавок – в пониженной твердости поверхности, в недостаточной глубине цементованного слоя и нарушениях правил сборки узла. Многочисленные исследования и наблюдения за работой карданного шарнира в эксплуатации позволили провести ЗИЛу целый комплекс мероприятий по повышению ресурса карданного шарнира. Одним из мероприятий явился переход завода на крестовины из стали пониженной прокаливаемости – 58ПП. Эта сталь имеет мелкозернистое строение и отличается малой склонностью к росту зерна. Крестовины из этой стали обладают высокой усталостной контактной прочностью. Однако даже применение крестовин из стали с пониженной прокаливаемостью еще не обеспечивает оптимальной их долговечности.

Решение проблемы низкой прокаливаемости и увеличения сроков эксплуатации может быть достигнуто применением новой конструкции карданного шарнира. Данная конструкция позволит обеспечить более высокую закалку сменных втулок и возможность замены частей карданного шарнира без

демонтажа всей карданной передачи. Использование сборного карданного шарнира со сменными втулками позволит увеличить сроки эксплуатации карданных шарниров.

Анализ конструкций карданных шарниров.

Проведенный патентный поиск выявил ряд способов и устройств, направленных на решение проблемы выхода из строя подшипниковых узлов на игольчатых подшипниках.

Например, известен карданный шарнир [3], который включает в себя (рис. 3) крестовину 1 с шипами 2, на которых установлены игольчатые подшипники 3, закрепленные в проушинах вилок 4 с помощью крышек 5. Причем каждый шип крестовины выполнен с двумя продольными разрезами, ширина которых значительно меньше диаметра $D_w (< D)$, а длина L меньше длины L_w игольчатого ролика ($L < L_w$), размещенными в диаметральной плоскости, перпендикулярной плоскости расположения шипов крестовины, причем в цилиндрическом отверстии каждого шипа установлена с возможностью перемещения вдоль продольной оси шипа втулка. В цилиндрическом отверстии каждого шипа 2 посредством разъемного подвижного соединения, например резьбового, установлена втулка 6, выполненная в виде усеченного конуса. При работе карданного шарнира нагрузка от ведущего вала передается на ведомый вал посредством карданных вилок 4 через игольчатые подшипники 3 и шипы 2 крестовины 1.

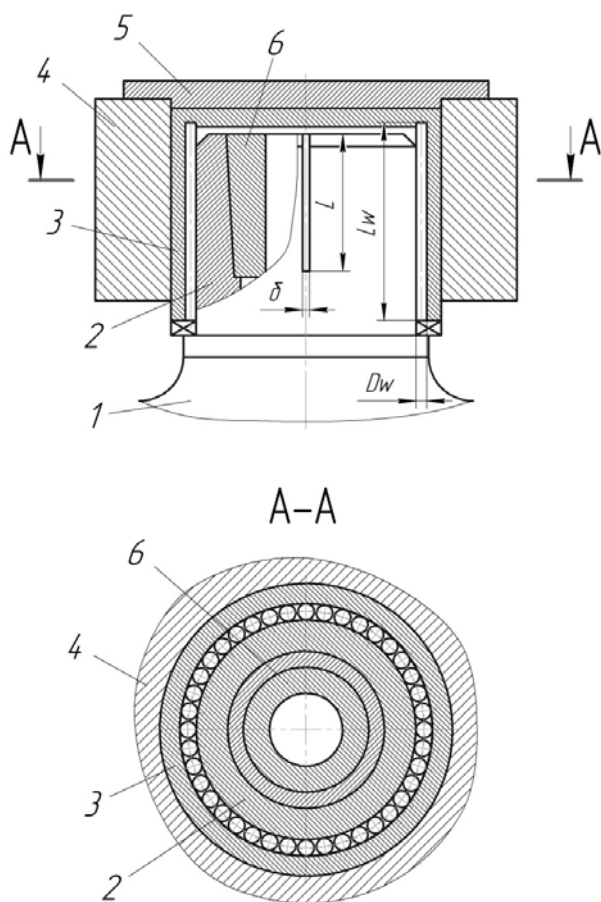


Рис. 3. Карданный шарнир

Выполнение шипов с продольными разрезами позволяет снизить их жесткость, а установка втулки, выполненной в виде усеченного конуса, в цилиндрическом отверстии шипа посредством подвижного разъемного соединения, например резьбового, позволяет путем введения упомянутой втулки в цилиндрическое отверстие шипа в направлении к центру крестовины в процессе технического обслуживания оказывать распирающее действие на шип и таким образом восстанавливать диаметр шипов до номинального значения с целью компенсации износа.

Размещение продольных разрезов в диаметральной плоскости, перпендикулярной плоскости расположения шипов крестовины, приводит к расположению разрезов по краям рабочей зоны сопряжения «шип крестовины – игольчатый подшипник», что в совокупности с ограничением размеров разрезов препятствует заклиниванию игольчатых роликов в разрезах и вытеканию смазки из сопряжения. Для устранения ударов при перекачивании игольчатых роликов по шипам в местах разрезов в последние можно установить плоские вставки.

Применение подвижного разъемного соединения, в частности, резьбового соединения шипов крестовины и втулок в виде усеченного конуса, обеспечивает техническую реализацию эффекта регулировки сопряжения «шип крестовины – игольчатый подшипник» на начальный или нулевой радиальный зазор, что снижает влияние радиального зазора на ресурс упомянутого сопряжения.

Карданные шарниры [9] включают в себя (рис. 4–6) две вилки 2, игольчатые подшипники 4 и крестовину 1, на шипы которой напрессованы втулки 3 из материала с высокой твердостью поверхности (рис. 4). При этом каждая втулка выполнена либо с разрезом в направлении образующей цилиндрической поверхности таким образом, что длина окружности по наружному диаметру втулки больше длины окружности по внутреннему диаметру игольчатого подшипника на величину зазора в разрезе, либо в виде витой цилиндрической пружины кручения с соприкасающимися витками. При этом втулка в виде витой цилиндрической пружины устанавливается на шип крестовины, имеющий ответную наружную поверхность.

На рис. 4 показан карданный шарнир с осевым разрезом сопряжения «шип крестовины – втулка – игольчатый подшипник» в сборе с разрезной втулкой. На рис. 5 представлен вариант выполнения втулки в виде витой цилиндрической пружины кручения из проволоки круглого сечения, на котором показаны средний D_{cp} и наружный D_1 диаметры пружины, а также номинальный диаметр $D_{ном}$ рабочей цилиндрической поверхности втулки. На рис. 6 изображен вариант выполнения втулки в виде витой цилиндрической пружины кручения из проволоки, сечение которой имеет форму выпуклого многоугольника, с указанием положения характерных размеров.

В случае применения цилиндрической разрезной втулки 3 (рис. 4) ее внутренний диаметр больше наружного диаметра шипа 2, что приводит к образованию зазора в данном соединении. Для установки игольчатого подшипника 4 сжимают втулку 3 в радиальном направлении до соприкосновения краев разреза.

В этом случае наружный диаметр втулки 3 совпадает с внутренним диаметром игольчатого подшипника 4, который устанавливают на втулку 3. После установки игольчатого подшипника 4 снимают сжимающее действие с втулки 3. Вследствие наличия сил упругости в материале втулки 3 последняя разжимается и оказывает распирающее действие на игольчатый подшипник 4.

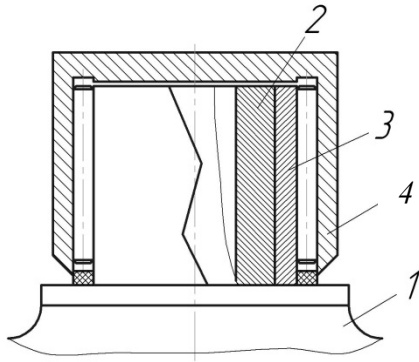


Рис. 4. Карданный шарнир с разрезной втулкой

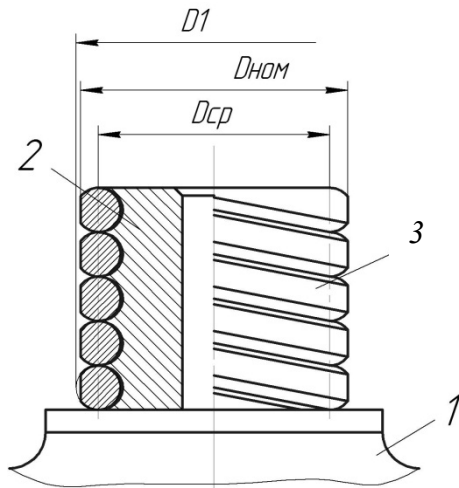


Рис. 5. Карданный шарнир с витой цилиндрической пружиной из проволоки круглого сечения

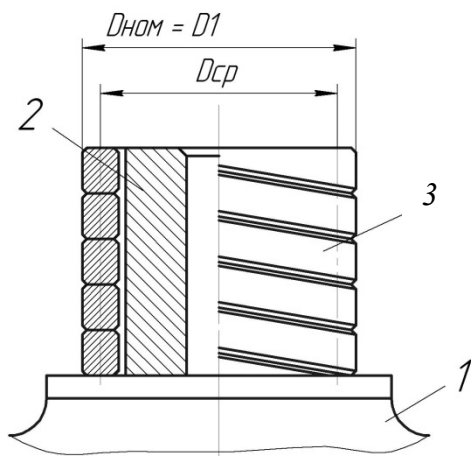


Рис. 6. Карданный шарнир с витой цилиндрической пружиной из проволоки, сечение которой имеет форму выпуклого многоугольника

В случае применения втулки 3, выполненной в виде витой цилиндрической пружины кручения (рис. 5, 6), сборку сопряжения «шип крестовины – втулка» осуществляют с учетом ответной поверхности шипа 2, зависящей от формы сечения проволоки. Перед установкой игольчатого подшипника 4 (рис. 4) втулку 3 закручивают. В результате наружный диаметр втулки 3 становится равным внутреннему диаметру игольчатого подшипника 4 (рис. 4), что способствует установке последнего на втулку 3. Далее силовое воздействие с втулки 3 снимают, и силы упругости материала последней оказывают распирающее действие на игольчатый подшипник 4 (рис. 4).

Использование проволоки различной формы сечения позволяет варьировать исполнение втулки в виде витой цилиндрической пружины кручения различной жесткости в зависимости от конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров карданного шарнира.

Известен карданный шарнир [10], содержащий (рис. 7) две вилки, игольчатые подшипники 3 и крестовину 1, на шипы которой напрессованы втулки 2 из материала с высокой твердостью поверхности. Отверстие втулки и наружная поверхность шипа в поперечном сечении имеют форму выпуклого правильного многоугольника.

Наличие поверхности сопряжения шипа и втулки, выполненной в поперечном сечении в форме выпуклого правильного многоугольника, дает возможность более полно использовать рабочую поверхность втулки путем установки ее на шипе с проворотом на угол, достаточный для замены изношенной рабочей поверхности втулки на неизношенную.

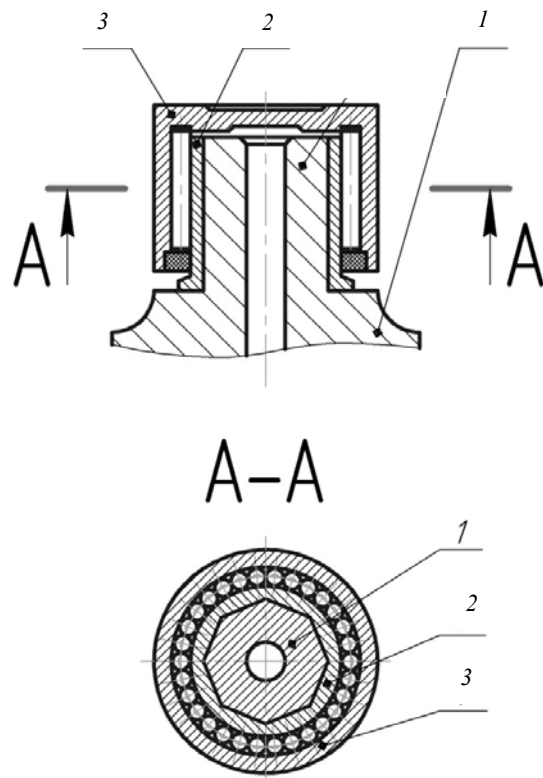


Рис. 7. Карданный шарнир с втулками из материала высокой твердости

Техническое решение, описанное в патенте на изобретение карданного шарнира [11], включает в себя (рис. 8) вилки, игольчатые подшипники 2, крестовину 5, 6 с втулками 4, радиальные и осевые уплотнения. Втулка шипа крестовины выполнена в виде стакана 1, при этом в основании корпуса игольчатого подшипника с рамкой качения 3 и упомянутой втулки расположены центральные соосные отверстия 7 и 8, каждое из которых выполнено в виде правильного выпуклого многоугольника, а между основанием корпуса игольчатого подшипника 2 и крышкой 9 установлен уплотнительный элемент 10. Разборку карданного шарнира выполняют частично, заменяют изношенные поверхности на неизношенные дифференцированно для каждого подшипникового узла путем проворота игольчатого подшипника и втулки посредством соосных отверстий в основаниях подшипника и втулки.

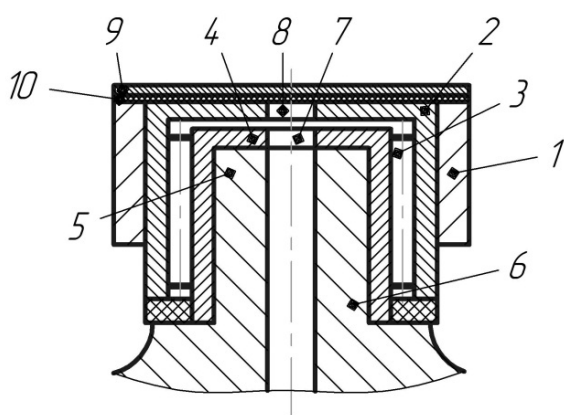


Рис. 8. Карданный шарнир с втулками

К недостаткам перечисленных выше карданных шарниров [3; 9–11] можно отнести то, что в процессе работы шипы крестовины быстро изнашиваются, вследствие неравномерного износа шипов крестовины, и не могут быть заменены без демонтажа карданной передачи, использование цельной крестовины не позволяет выполнять раздельную закалку шипов крестовины, что затрудняет установку крестовины карданного шарнира в вилки карданной передачи. Недостаточная герметичность уплотнений подшипниковых узлов, которые в процессе работы меняют контактирующие поверхности вследствие неравномерного износа шипов крестовины, приводит к тому, что в полость вращения тел качения попадают инородные частицы, способствующие преждевременному износу карданного шарнира.

Известен патент на изобретение [12] шарнира, состоящего из вилок, подшипников, разборной крестовины, состоящей из разборного корпуса и шипов. Шипы установлены на центрирующем элементе, выполненном в виде крестовины, а их торцы, расположенные в полости корпуса, выполнены с возможностью передачи вращения для поворота шипов, при этом в полости корпуса крестовины установлен приводной элемент с возможностью обеспечения указанного поворота.

Карданный шарнир (рис. 9) содержит вилки 1, в проушинах которых установлены подшипники 2.

Крестовина выполнена разборной и состоит из шипов 3 и разборного корпуса 4. Шипы 3 своими торцами, например в форме конических колес, установлены в полости разборного корпуса 4 и зафиксированы болтами 5, а торцы шипов 3, расположенные вне корпуса 4, установлены в подшипники 2. Для осуществления привода передачи, образованной торцами шипов 3 с одним из конических колес, установлена в зацеплении приводная коническая шестерня 6. Хвостовик вала упомянутой шестерни 6 расположен вне корпуса 4, и его сечение выполнено в форме, позволяющей повернуть шестерню 6 при помощи инструмента, например в форме квадрата. Для повышения жесткости крестовины в осевые отверстия шипов 3 установлен центрирующий элемент 7 в виде крестовины.

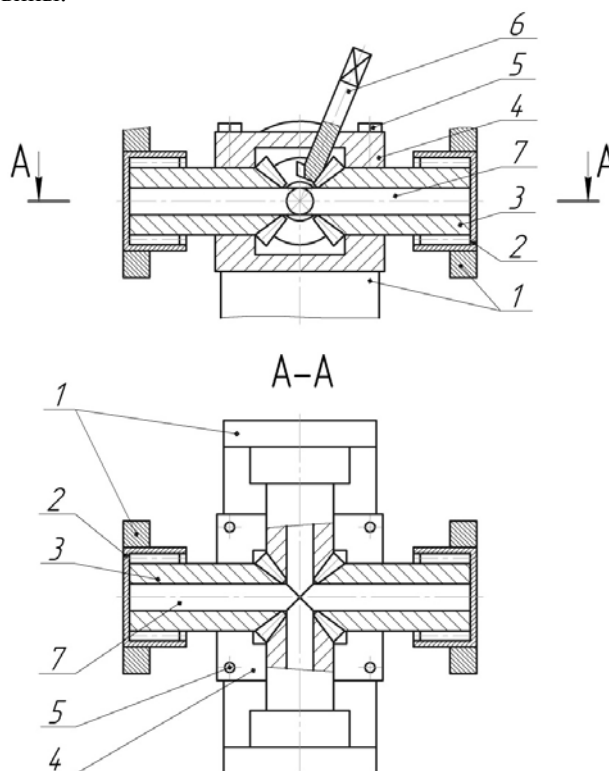


Рис. 9. Карданный шарнир с разборным корпусом

Недостаток заключается в том, что сменные шипы крестовины установлены на центрирующем элементе и не могут быть заменены без демонтажа карданной передачи в случае повреждения одного из шипов карданного шарнира, проблема установки карданного шарнира в вилки карданной передачи не решена.

Известен карданный шарнир [13], состоящий из вилок, крестовины и четырех игольчатых подшипников, установленных на шипах крестовины и закрепленных в вилках. Игольчатые подшипники смазываются через пресс-масленку по внутренним каналам крестовины. Недостатком карданного шарнира является низкая надежность при эксплуатации, связанная с утечкой смазки из игольчатых подшипников, в результате чего происходит нарушение процесса поступления смазки к рабочим поверхностям шипов и игольчатых подшипников.

Результаты анализа конструкций карданных шарниров. Проведенный анализ позволил предложить новые конструкции карданных шарниров [14; 15]. Карданный шарнир со сменными шипами крестовины [14] включает в себя (рис. 10) две вилки 7, крестовину 1 с четырьмя шипами 2, выполненными съемными в виде ступенчатых втулок, имеющих в сечении меньшей ступени форму многогранника, установленных меньшей ступенью в ответные глухие отверстия крестовины 1 до упора по торцевым поверхностям и имеющих внутренние осевые каналы для смазки, тавотницу 6 и установленные на шипах игольчатые подшипники 3, запрессованные в вилки 7 и зафиксированные от осевого смещения стопорными кольцами 8. Манжеты 4, 5 установлены на шипах крестовины и предназначены для защиты подшипников от попадания в область работы инородных тел и выхода смазочного материала. Через тавотницу 6 нагнетается смазочный материал.

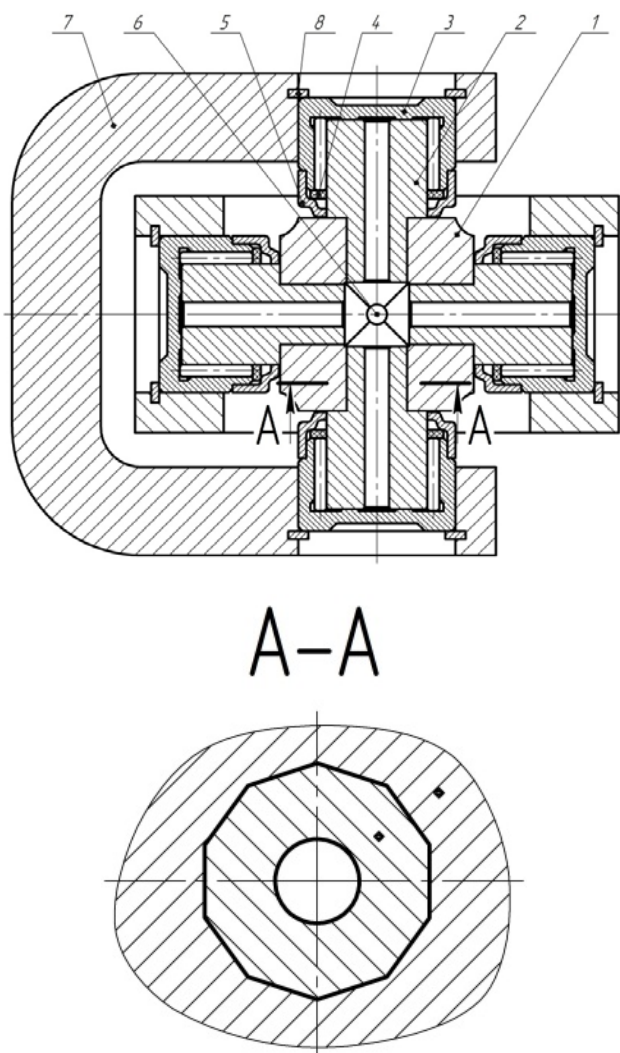


Рис. 10. Карданный шарнир со сменными шипами

Предложенное устройство работает следующим образом: при передаче крутящего момента вилке 7 воздействуют на сборную крестовину через игольчатые подшипники 3. При каждом обороте шарнира поочередно работают два игольчатых подшипника 3,

расположенных в противоположных подшипниковых узлах каждой вилки, радиальная нагрузка воспринимается вилками шарнира.

В случае наработки карданного шарнира до заданного предела или повреждения одного или нескольких шипов крестовины производят переустановку сменных шипов на одну грань или заменяют их. Снимаются стопорные кольца 8 с вилок 7 карданной передачи, вынимаются игольчатые подшипники 3, вынимаются шипы 2. Шипы 2 переустанавливаются с поворотом вдоль оси на одну грань или несколько граней, в зависимости от износа, или заменяются новыми. Устанавливаются игольчатые подшипники 3 на шипы крестовины и фиксируются в вилках 7 карданного шарнира стопорными кольцами 8. Через тавотницу 6 с помощью пресс-масленки карданный шарнир заполняется смазочным материалом.

Технический эффект заключается в обеспечении возможности замены частей карданного шарнира без демонтажа всей карданной передачи за счет использования сборного карданного шарнира со сменными втулками.

Карданный шарнир [15] состоит (рис. 11, 12) из вилок 1, крестовины 4 с установленными на ее шипах игольчатыми подшипниками, состоящими из корпуса 2, выполненного в форме цилиндрического стакана, и тел качения 3. Подшипники снабжены уплотнениями 5, выполненными в виде гофрированной трубы 6, имеющей форму усеченного конуса, заканчивающегося со стороны большего основания коаксиальной шайбой 7 L-образного сечения, состоящей из соединенных в единое целое внутренней кольцевой части, контактирующей с торцевыми поверхностями тел качения, и цилиндрической наружной части, зафиксированной в ответной коаксиальной цилиндрической проточке, выполненной в торце корпуса игольчатого подшипника в виде полый цилиндрической втулки, а со стороны меньшего основания – кольцом 8 в форме тора, зафиксированном в ответной торообразной проточке, выполненной в теле крестовины у основания шипа.

Карданный шарнир работает следующим образом: при передаче крутящего момента вилка 1 воздействует на крестовину 4 через игольчатые подшипники. При каждом обороте шарнира поочередно работают два игольчатых подшипника, расположенных в противоположных подшипниковых узлах каждой вилки, радиальная нагрузка воспринимается вилками шарнира. Уплотнение 5 защищает рабочую полость карданного шарнира от попадания в нее инородных частиц. При работе карданного шарнира уплотнение в форме гофрированной трубы 6 позволяет максимально растягиваться и сжиматься в осевом и радиальном направлении под действием давления смазки, ограничивая смещение тел качения 3 из рабочей области игольчатых подшипников без нарушения герметизации рабочего пространства.

Предлагаемая конструкция позволяет исключить попадание инородных тел в рабочую полость карданного шарнира и утечку смазочного материала, повысить надежность карданных шарниров за счет герметизации рабочей полости.

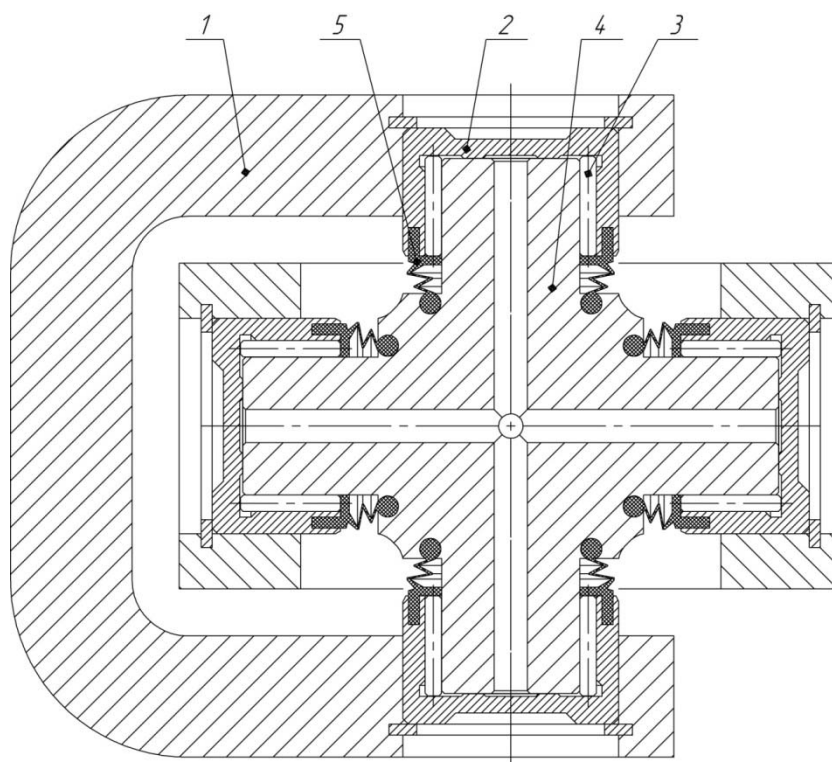


Рис. 11. Карданный шарнир

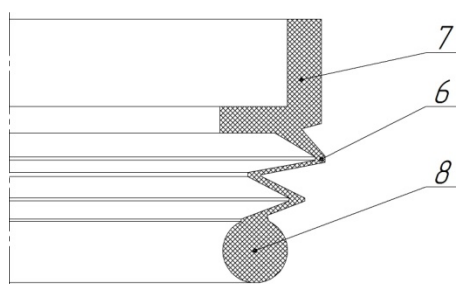


Рис. 12. Уплотнение карданного шарнира

Заключение. Таким образом, на основе проведенного анализа известных карданных передач были решены две задачи: обеспечение возможности замены частей карданного шарнира без демонтажа всей карданной передачи за счет использования сборного карданного шарнира со сменными втулками; исключение попадания инородных тел в рабочую полость карданного шарнира и утечки смазочного материала, повышение надежности карданных шарниров за счет герметизации рабочей полости новым уплотнением карданного шарнира. Предложены два варианта конструкций карданных шарниров на игольчатых подшипниках, позволяющие решить поставленные задачи.

Благодарности. Результаты получены в рамках выполнения госзадания № 9.447.2014/к и 211/2014.

Acknowledgements. The results obtained in the framework of the state order № 9.447.2014 / к и 211/2014.

Библиографические ссылки

1. Меновщиков В. А., Ереско С. П. Исследование и совершенствование игольчатых подшипников карданных передач транспортно-технологических

машин : монография / КрасГАУ. Красноярск, 2006. 283 с.

2. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Современное состояние вопроса по исследованию пластического деформирования при статическом контактом нагружении игольчатых подшипников // Механика XXI века : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : сб. докладов. Братск : Изд-во ГОУ ВПО «БрГУ», 2013. С. 37–40.

3. Пат. 2224917 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 11/06. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Деревянкин В. Н. № 2002113785/11 ; заявл. 27.05.2002; опубл. 27.02.2004.

4. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge University Press, 2001. P. 200.

5. Popov V. L. Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation. Springer-Verlag, 2009. 328 p.

6. Popov V. L. Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications. Springer-Verlag, 2010. 362 p.

7. Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small

wavelengths // *Tribology International*. 2007, Vol. 40. P. 1413–1422.

8. Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А. Конструкция карданного шарнира со сменными шипами крестовины // *Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. / СибГАУ*. Красноярск, 2014. Ч. 2. С. 298–300.

9. Пат. 2220338 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 11/06. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Ольховский С. Н., Худошин А. С. № 2001120572/11 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.12.2003.

10. Пат. 2205304 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 11/06. Карданный шарнир / Сигаев А. М., Пастухов А. Г., Чехунов О. А. № 2001113339/28 ; заявл. 14.05.2001 ; опубл. 27.05.2003.

11. Пат. 2232309 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 11/06. Карданный шарнир / Тимашов Е. П., Пастухов А. Г., Скурятин Н. Ф. № 2003100986/11 ; заявл. 13.01.2003 ; опубл. 10.07.2004.

12. Пат. 2238446 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 C 11/06. Карданный шарнир и способ его технического обслуживания / Скурятин Н. Ф., Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. № 2003106909/11 ; заявл. 12.03.2003 ; опубл. 20.10.2004.

13. Учебник тракториста-машиниста третьего класса : учебник / А. К. Болотов [и др.]. М. : Колос, 1982. 100 с.

14. Пат. 141878 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 D 3/26. Карданный шарнир / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. № 2014102339/11 ; заявл. 24.01.2014 ; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. 2 с.

15. Пат. 146989 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 D 3/26. Карданный шарнир / Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Орлов А. А., Ереско С. П., Ереско Т. Т. № 2014119234/11 ; заявл. 13.05.2001 ; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 30. 2 с.

References

1. Menovshchikov V. A., Eresko S. P. *Issledovanie i soverhenstvovanie igolchatykh podshipnikov kardanii peredach transportno-tehnologicheskoi mashiny*. [Study and improvement of needle bearings driveline transport and technological machines]. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2006, 283 p.

2. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [State of the art research of plastic deformation under static loading pin needle bearings]. *Sovremennoe sostoyanie voprosa po issledovaniyu plasticheskogo*

deformirovaniya pri staticheskom kontaktnom nagruzenii igolchatykh podshipnikov. [Proceedings of the XII All-Russian scientific conference with international participation “Mechanics XXI Century”]. Bratsk, 2014, P. 37–40 (In Russ.).

3. Sigayev A. M., Shepherds A. G., Derevyankin B. N. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 2224917, 2004.

4. Johnson K. L. *Contact mechanics*. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001, 200 p.

5. Popov V. L. *Kontaktmechanik und Reibung. Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation*, Springer-Verlag, 2009, 328 p.

6. Popov V. L. *Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications*, Springer-Verlag, 2010, 362 p.

7. Hyun S., Robbins M. O. Elastic contact between rough surfaces: Effect of roughness at large and small wavelengths. *Tribology International*, 2007, Vol. 40, P. 1413–1422.

8. Eresko T. T., Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A. [Universal joint design with replaceable spikes]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. “Reshetnevskie chteniya”* [Materials XVIII Intern. scientific. Conf. “Reshetnev Readings”]. Krasnoyarsk. 2014, P. 298–300 (In Russ.).

9. Sigayev A. M., Shepherds A. G., Olkhovskiy S. N., Hudoshin A. S. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 2220338, 2003.

10. Sigayev A. M., Shepherds A. G., Chekhun A. A. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 2205304, 2003.

11. Timashov E. P., Shepherds A. G., Skuryatin N. F. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 2232309, 2014.

12. Skuryatin N. F., Shepherds A. G., Timashov E. P. *Kardanyi sharnir i metod ego tehniceskogo obsluzhivania*. [Universal joint and method of maintenance]. Patent RF, no. 2238446, 2004.

13. Bolotov A. K., Gurevich L. A., Likhanov V. A., Sychugov N. P. *Uchebnik traktorista-mashinista tret'ego klassa* [Textbook of tractor driver of the third class]. Moscow, Kolos Publ., 1982, 100 p.

14. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Eresko S. P., Eresko T. T. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 141878, 2014.

15. Kukushkin E. V., Menovshchikov V. A., Orlov A. A., Eresko S. P., Eresko T. T. *Kardanyi sharnir*. [Joint]. Patent RF, no. 146989, 2014.

© Ереско С. П., Ереско Т. Т.,
Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., 2015

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТОМНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕРФЕЙСОВ LSMO С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ХИРАЛЬНОСТИЕ. А. Ковалева^{1,2*}, А. А. Кузубов^{1,2}, А. В. Куклин^{1,2}, Ю. Г. Михалев¹, З. И. Попов^{2,3}¹ Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

² Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50–38

³ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru

Замещенные манганиты лантана с общей формулой $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ (LSMO) являются перспективными материалами спинтроники и спинкалоритроники, что обусловлено практически стопроцентной спиновой поляризацией данных материалов. На основе интерфейсов LSMO-графен были созданы высокоэффективные органические светодиоды (OLED) и спиновые клапаны. Многостенные углеродные нанотрубки, соединяющие электроды на основе $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, являющегося полуметаллом, демонстрируют высокое магнитное сопротивление, большое время жизни ориентированного спина, высокую скорость Ферми. Полученные экспериментальные результаты подтверждаются также данными квантово-химических расчетов. Тем не менее интерфейсы замещенных манганитов лантана с углеродными нанотрубками в настоящее время изучены недостаточно. В ходе квантово-химического исследования взаимодействия углеродных нанотрубок различной хиральности с поверхностью замещенного манганита лантана $La_{0.67}Sr_{0.33}MnO_3$ при помощи теории функционала плотности в обобщенно-градиентном приближении с использованием поправки Хаббарда и коррекции вандерваальсова взаимодействия рассмотрены различные варианты расположения нанотрубок относительно атомов пластины. Рассмотрены нанотрубки как конфигурации «зигзаг» (хиральности (9,0)), так и конфигурации «кресло» (хиральности (5,5)). Построены парциальные плотности состояний атомов нанотрубок, исследовано влияние подложки на электронную структуру нанотрубок, а также возможность применения исследуемых наноконструкций в устройствах спинтроники. Показано, что при взаимодействии углеродных нанотрубок с поверхностью LSMO (001) вследствие несовпадения структурных параметров наблюдается деформация нанотрубок по сравнению с исходной структурой. Нанотрубка хиральности (9,0) после взаимодействия с пластиной оказывается сжатой примерно на 9 %, в то время как нанотрубка хиральности (5,5) растягивается примерно на 5 %. Установлено, что указанная деформация приводит к значительному изменению электронной структуры нанотрубок и смещению уровня Ферми. Однако несмотря на то, что композиты в целом оказываются практически полностью спин-поляризованными, данный эффект обусловлен присутствием LSMO в составе системы, в то время как различия в заселенности разных спиновых подсистем для нанотрубок практически отсутствуют.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, спиновая поляризация, спинтроника, LSMO, GGA+U.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 729–734**ATOMIC AND ELECTRONIC STRUCTURE
OF CNT/LSMO-BASED NANOCOMPOSITES: A DFT STUDY**Е. А. Kovaleva^{1,2*}, А. А. Kuzubov^{1,2}, А. В. Kuklin^{1,2}, Yu. G. Mikhalev¹, Z. I. Popov^{2,3}¹ Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

² Kirensky Institute of Physics SB RAS

50–38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³ Reshetnev Siberian State Aerospace University

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru

Complex half-metallic manganites $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) are promising materials for spintronic and spicaloritronic applications due to 100 % of spin polarization. Using spin-polarized currents through LSMO-graphene interfaces a number of LSMO-based high-efficiency organic LED and spin-valve nanodevices have been developed. Large magnetoresistance effects bonded with large output signals were detected in a nanodevice. The device of multiwall carbon nanotube that spans a gap between spin-polarized half-metallic $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ electrodes demonstrated long spin lifetime and high Fermi velocity in the nanotube, the high spin polarization of the manganite electrodes and the resistance of the interfacial barrier for spin injection. The experimental results were supported by density functional theory calculations. Interfaces of $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ with armchair and zigzag carbon nanotubes (CNT) were studied by means of quantum chemistry within density functional theory. All calculations were performed using generalized gradient approximation with Hubbard correction (GGA+U) and Grimme correction of dispersion interaction. Different configurations of composite compartments mutual arrangement were considered. The analysis of partial densities of states (PDOS) reveals the influence of substrate on nanotube's electronic structure. The possibility of nanotubes' spin polarization and utilization of such nanocomposites in spintronics is also discussed. It was found that interaction between carbon nanotubes and LSMO slab lead to major deformation of the tube due to the difference in structural parameters of composite compartments. Zigzag (9,0) nanotube is contracted by 9% while armchair (5,5) nanotube is stretched by 5 %. Although this deformation results in significant change in nanotube's electronic structure, there is no visible difference between spin-up and spin-down PDOSes of the tubes. Composites are then almost totally spin-polarized due to the presence of LSMO.

Keywords: carbon nanotubes, spin polarization, spintronics, LSMO, GGA+U.

Введение. Дальнейший прогресс в области применения графена и композитов на его основе в качестве устройств спинтроники и спинкалоритроники связан в первую очередь с использованием высокой подвижности электронов наряду со спиновым транспортом вдоль гексагональной решетки графена, что может быть достигнуто за счет слабых спин-орбитальных взаимодействий атомов углерода [1–3]. Экспериментально была показана возможность инжекции электронов с определенной ориентацией спина из ферромагнитной подложки (например, поверхность Ni (111)) в графен [4]. Кроме того, высокое магнитное сопротивление наблюдается в расположенных на подобных подложках органических фрагментах, имеющих π -сопряженную структуру [5–9]. Расположенный между слоем графена и подложкой ферромагнитного металла планарный монослой гексагонального нитрида бора (h -BN) обеспечивает химическую пассивацию поверхности и облегчает инжекцию спина в графен [10; 11].

Открытие спинового эффекта Зеебека [12] в ферромагнитных материалах позволяет управлять электрическим и спиновым током при помощи градиента температуры, что в свою очередь может быть использовано в спинкалоритронике. Спиновое туннелирование [13] через границу раздела «ферромагнетик–полупроводник» позволяет достигать высокой степени спиновой поляризации полупроводника и протекания спинового тока в системе.

Замещенные манганиты лантана с общей формулой $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) являются перспективными материалами спинтроники и спинкалоритроники, что обусловлено практически стопроцентной спиновой поляризацией данных материалов. Кроме того, они обладают такими важными свойствами, как высокая температура Кюри ($T_c = 370$ К), низкая плотность носителей заряда ($1021\text{--}1022\text{ см}^{-3}$), колоссальное магнитное сопротивление, высокая эффективность спиновой инжекции [14–16]. На основе интерфейсов LSMO–графен были созданы высокоэффективные органические светодиоды (OLED) и спиновые клапаны [17; 18]. Многостенные углеродные нанотрубки,

соединяющие электроды на основе $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, являющегося полуметаллом, демонстрируют высокое магнитное сопротивление, большое время жизни ориентированного спина, высокую скорость Ферми. В то же время электроды являются сильно спин-поляризованными. Полученные экспериментальные результаты подтверждаются также данными квантово-химических расчетов [19]. Тем не менее следует отметить, что интерфейсы замещенных манганитов лантана с углеродными нанотрубками в настоящее время изучены недостаточно.

Целью настоящей работы являлось квантово-химическое исследование природы взаимодействия одностенных углеродных нанотрубок конфигураций «зигзаг» и «кресло» с поверхностью LSMO (001) и изучение электронной структуры и магнитных свойств указанных композитов.

Методы и детали расчета. Расчеты проводились в рамках формализма теории функционала плотности с использованием обменно-корреляционного функционала GGA PBE с поправкой Хаббарда (GGA+U), коррекцией вандерваальсова взаимодействия D3 Grimme в периодических граничных условиях. Параметры $U = 2$ и $J = 0,7$ эВ были выбраны на основании более ранних расчетов LSMO [20]. Энергия обрезания плоских волн (E_{cutoff}) во всех расчетах равнялась 450 эВ. Оптимизация геометрии исследованных композитов велась до значения остаточных сил, действующих на атомы, менее $0,01$ эВ/Å. Обратное пространство в первой зоне Бриллюэна автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста–Пака. Все расчеты проводились при помощи программного пакета VASP [21–23].

На начальном этапе работы была смоделирована элементарная ячейка $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$, имеющая псевдокубическую структуру типа перовскита. Полученное в тестовых расчетах с количеством k -точек вдоль каждого из направлений $12 \times 12 \times 12$ значение вектора трансляции ($3,886$ Å) хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными ($a = 3,876$ Å [24] и $a = 3,87$ [25]), а также результатами предыдущих расчетов ($a = 3,89$ Å [26]).

Пластина LSMO состоит из трех слоев MnO, двух LaO и завершающего верхнего слоя SrO. Каждый атом Mn окружен шестью атомами кислорода, Sr и La имеют по четыре координирующих атома. При этом атомы La и Sr образуют отдельные слои и расположены в центре кубов, образованных MnO. Согласно имеющимся экспериментальным и теоретическим данным, поверхность LSMO в большинстве случаев оканчивается слоем SrO [27], что было учтено при проведении расчета.

С целью обеспечения наилучшего совпадения структурных параметров исследуемых нанотрубок и подложки в расчете были использованы два типа суперячеек LSMO: $8 \times 1 \times 1$ ($a = 31,09 \text{ \AA}$, $b = 3,88 \text{ \AA}$, $c = 30,00 \text{ \AA}$) в случае CNT (9,0) и $6 \times 2 \times 1$ ($a = 23,32 \text{ \AA}$, $b = 7,77 \text{ \AA}$, $c = 30,00 \text{ \AA}$) для расчета интерфейса с CNT (5,5). Во избежание взаимного влияния образов в соседних ячейках вдоль направления c был задан вакуумный промежуток $>10 \text{ \AA}$. Количество k -точек вдоль наименьшего периодического направления b (прямой решетки) составило 6 и 2 для разных суперячеек соответственно; вдоль направлений a и $c - 1$.

Проводящие углеродные нанотрубки хиральности (9,0) были расположены относительно поверхности LSMO (001) следующим образом (рис. 1): а) атом Sr расположен под связью C–C (конфигурация bond, рис. 1, а, таблица); б) атом Sr расположен в центре шестиугольника (конфигурация hexagon-1, рис. 1, б, таблица); в) атомы кислорода расположены в центре шестиугольника и под связью C–C (конфигурация hexagon-2, рис. 1, в, таблица). Следует отметить, что разница между параметрами решетки LSMO и периодом нанотрубки приводит к значительному сжатию последней ($\sim 9\%$).

Также были рассмотрены близкие к (9,0) по размерам проводящие углеродные нанотрубки хиральности (5,5) (диаметр трубок 7,05 и 6,97 $\text{\AA}$, соответственно). Для системы CNT (5,5) / LSMO была рассмотрена конфигурация hexagon-1, которая оказалась наиболее энергетически выгодной в случае CNT (9,0) / LSMO (рис. 2, таблица). В результате несовпадения структурных параметров пластины LSMO и трубки последняя также несколько деформирована (величина растяжения $\sim 5\%$).

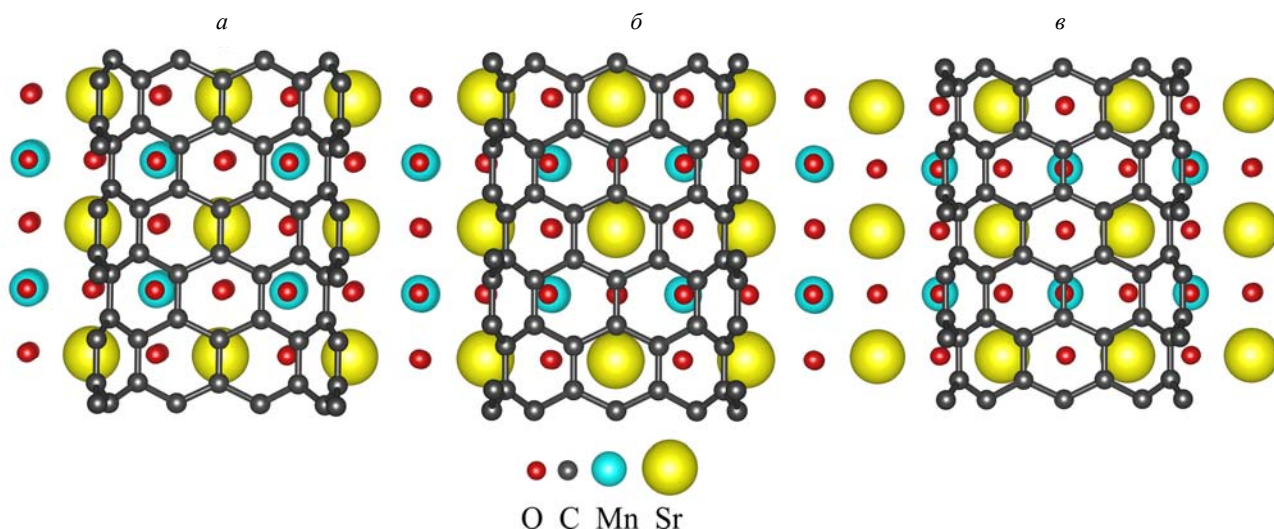


Рис. 1. Варианты расположения углеродной нанотрубки (9,0) на поверхности LSMO:
а – bond; б – hexagon-1; в – hexagon-2

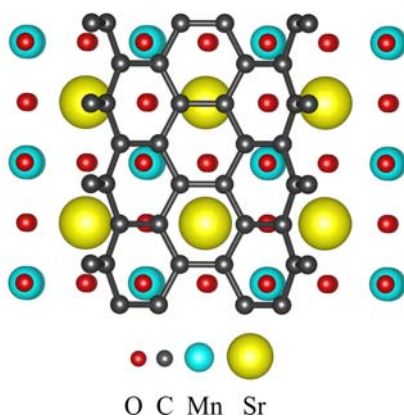


Рис. 2. Расположение углеродной нанотрубки (5,5) на поверхности LSMO

Обсуждение результатов. Значения энергии и длины связей свидетельствуют о наличии слабого вандерваальсова взаимодействия между углеродными нанотрубками и пластиной LSMO. Наиболее энергетически выгодной в системе CNT (9,0) / LSMO является конфигурация hexagon-1. Атом стронция в этом случае несколько смещается от центра шестиугольника в процессе оптимизации геометрии (рис. 1, б), что обуславливает меньшую длину связи. Тем не менее конфигурация bond энергетически невыгодна, несмотря на также небольшую длину связи. В системе CNT (5,5) / LSMO подобного смещения не происходит.

Согласно результатам анализа электронной структуры исследуемых композитов (рис. 3), в обоих случаях существенные изменения по сравнению с LSMO отсутствуют. Несмотря на практически полную спиновую поляризацию композитов, характерную также и для пластины LSMO (рис. 3, а), парциальные плотности нанотрубок для разных спиновых подсистем имеют одинаковую интенсивность (рис. 4). Картины пространственного распределения спиновой плотности (рис. 3, б) также свидетельствуют об отсутствии спиновой поляризации нанотрубок.

Следует отметить, однако, что деформация нанотрубок приводит к перераспределению в них элек-

тронной плотности, заселению вакантных зон и изменению уровня Ферми (рис. 4). Схожий эффект наблюдается также и при взаимодействии с пластиной LSMO. В частности, при растяжении нанотрубки хиральности (5,5) отмечается появление запрещенной зоны шириной $\sim 0,2$ эВ, в то время как нанотрубка с оптимальным вектором трансляции является проводником (рис. 4, а). Взаимодействие с поверхностью LSMO (001), в свою очередь, приводит к заметному смещению пиков электронной плотности. Тем не менее рассчитанная величина спиновой поляризации нанотрубки (5,5) на уровне Ферми весьма незначительна ($\sim 1,7$ %). Аналогичные изменения электронной структуры происходят также и при деформации углеродной нанотрубки (9,0): ее сжатие приводит к значительному смещению уровня Ферми, а взаимодействие с пластиной LSMO – к размытию пиков (рис. 4, б). Спиновая поляризация в этом случае не превышает 0,3 %. Таким образом, несмотря на значительное влияние, оказываемое подложкой на электронную структуру расположенных на них углеродных нанотрубок, сколько-нибудь существенной разницы в заселении различных спиновых подсистем в этом случае не наблюдается. Электронная структура пластины LSMO при взаимодействии с углеродными нанотрубками практически не претерпевает изменений.

Энергии и длины связей композитов CNT/LSMO

Composite	CNT(9,0)/LSMO			CNT (5,5) / LSMO
	Hexagon-1	Hexagon-2	Bond	
Энергия связи, эВ	-0,5663	-0,3468	1,0213	-2,0710
Длина связи, Å	2,830	3,023	2,898	3,123

а

б

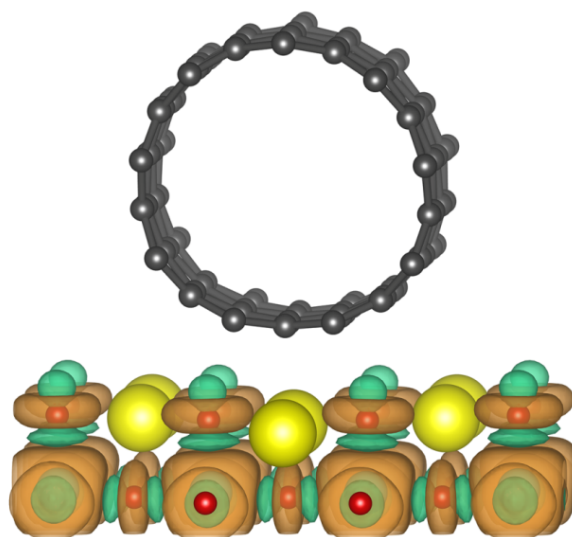
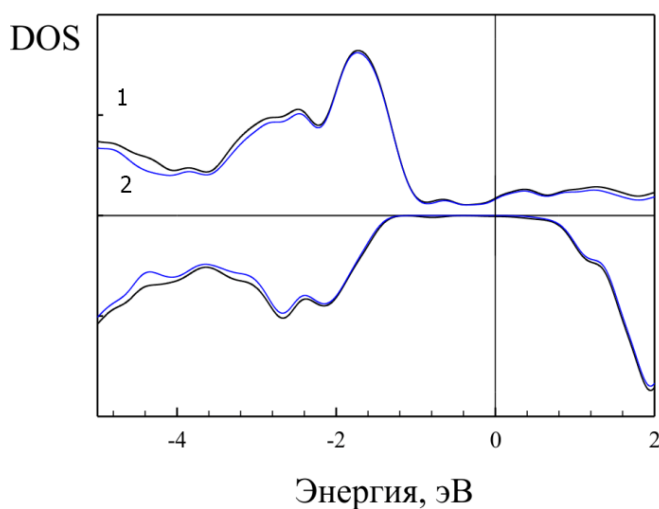


Рис. 3. Электронная структура композитов:
а – плотности состояний нанокompозита CNT (9,0) / LSMO (1 – полные, 2 – парциальные плотности состояний пластины LSMO); б – пространственное распределение спиновой плотности в нанокompозите CNT (5,5) / LSMO

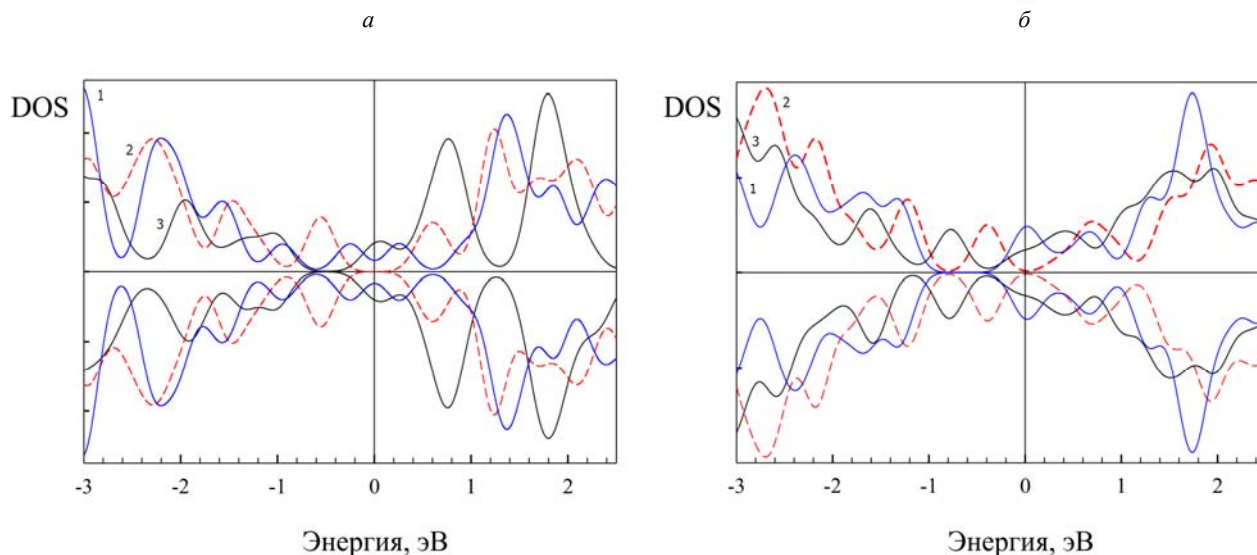


Рис. 4. Плотности состояний:

a – нанотрубки (5,5); *б* – нанотрубки (9,0); 1 – для структуры с оптимальным вектором трансляции; 2 – для деформированной в соответствии с структурными параметрами подложки; 3 – парциальные плотности состояний нанотрубки в нанокompозитах CNT/LSMO

Заклучение. В ходе работы были теоретически исследованы интерфейсы пластины замещенного манганита лантана $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}$ с углеродными нанотрубками конфигураций «кресло» и «зигзаг». Рассмотрены три различных варианта расположения нанотрубки хиральности (9,0) относительно атомов подложки. Наиболее энергетически выгодная для данной системы конфигурация была рассмотрена также для трубки хиральности (5,5). Установлено наличие слабого вандерваальсова взаимодействия между LSMO и нанотрубками. Различие в структурных параметрах исходных компонентов ведет к заметной деформации обеих нанотрубок, что, в свою очередь, сказывается на их электронной структуре. В то же время электронная структура пластины остается практически неизменной. Показано, что несмотря на практически полную спиновую поляризацию композитов как целого, обусловленную присутствием LSMO, поляризации углеродных нанотрубок в данном случае не происходит, в отличие от, например, интерфейсов с ферромагнитными поверхностями Co (0001) и Ni (111) [28]. Тем не менее, искусственное модифицирование поверхности путем напыления Mn может коренным образом поменять свойства интерфейса и требует более детального изучения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования Сибирскому федеральному университету (грант № 16.1500.2014/К). Авторы выражают благодарность Институту вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск; Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН, г. Москва; Центру коллективного пользования СФУ, г. Красноярск; а также Сибирскому суперкомпьютерному центру СО РАН, г. Новосибирск, за предоставленные возможности использования вычислительных кластеров, на которых были проведены расчеты.

Acknowledgements. This work was supported by the government contract of the Ministry of Education and Science of Russian Federation to Siberian Federal University (grant № 16.1500.2014/К). The authors would like to thank Institute of Computational Modelling of SB RAS, Krasnoyarsk; Joint Supercomputer Center of RAS, Moscow; Center of Equipment for Joint Use of Siberian Federal University, Krasnoyarsk; and Siberian Supercomputer Center (SSCC) of SB RAS, Novosibirsk for providing the access to their supercomputers.

References

1. Marrows C. H., Hickey B. J. Introduction: New directions in spintronics (2011) *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, p. 3027–3036. Doi: 10.1098/rsta.2011.0156.
2. Naber W. J. M., Faez S., Wiel W. G. Organic spintronics (2007) *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, R205. Doi:10.1088/0022-3727/40/12/R01.
3. Shiraishi M., Ikoma T. Molecular spintronics (2011) *Physica E*, 43, p. 1295–1317.
4. Tombros N., Jozsa C., Popinciuc M., Jonkman H. T., Wees B. J. Electronic spin transport and spin precession in single graphene layers at room temperature (2007) *Nature*, 448, p. 571–574. Doi:10.1038/nature06037.
5. Tsukagoshi K., Alphenaar B.W., Ago, H. Coherent transport of electron spin in a ferromagnetically contacted carbon nanotube (1999) *Nature*, 401, p. 572–574.
6. Xiong Z. H., Wu D., Vardeny V. Z., Shi J. Giant magnetoresistance in organic spin-valves (2004) *Nature*, 427, p. 821–824.
7. Petta J. R., Slater S. K., Ralph D. C. Spin-Dependent Transport in Molecular Tunnel Junctions (2004) *Phys. Rev. Lett.*, 93, 136601(4).
8. Sakai S., Yakushiji K., Mitani S., Takanashi K., Naramoto H., Avramov P., Narumi K., Lavrentiev V. Tunnel magnetoresistance in Co nanoparticle/Co-C60 compound hybrid system (2006) *Appl. Phys. Lett.*, 89, 113118(3).

9. Sakai S., Sugai I., Mitani S., Takanashi K., Matsumoto Y., Naramoto H., Avramov P. V., Okayasu S., Maeda Y. Giant tunnel magnetoresistance in co-deposited fullerene-cobalt films in the low bias-voltage regime (2007) *Appl. Phys. Lett.*, 91, 242104(3).
10. Xue J., Sanchez-Yamagishi J., Bulmash D., Jacquod P., Deshpande A., Watanabe K., Taniguchi T., Jarillo-Herrero P., LeRoy B. J. Scanning tunnelling microscopy and spectroscopy of ultra-flat graphene on hexagonal boron nitride (2011) *Nature materials*, 10, p. 282–285. Doi:10.1038/nmat2968.
11. Auwärter W., Muntwiler M., Osterwalder J., Greber T. Defect lines and two-domain structure of hexagonal boron nitride films on Ni(111) (2003) *Surface Science*, 545, p. L735–L740.
12. Jaworski C. M., Yang J., Mack S., Awschalom D. D., Heremans J. P., Myers R. C. Observation of the spin-Seebeck effect in a ferromagnetic semiconductor (2010) *Nature Mater.*, 9, p. 898–903. Doi:10.1038/nmat2860.
13. Le Breton J.-C., Sharma S., Saito, Yuasa S., Jansen R. Thermal spin current from a ferromagnet to silicon by Seebeck spin tunneling (2011) *Nature*, 475, p. 82–85. Doi:10.1038/nature10224.
14. Groot R. A., Mueller F. M., Engen P. G., Buschow K. H. J. New Class of Materials: Half-Metallic Ferromagnets (1983) *Phys. Rev. Lett.*, 50, p. 2024–2027.
15. Park J. H., Vescovo E., Kin H. J., Kwon C., Ramesh R., Ventakesan T. Direct evidence for a half-metallic ferromagnet (1998) *Nature*, 392, p. 794–796.
16. Viret M., Nassar J., Drouet M., Contour J. P., Fermon C., Fert A. Spin polarised tunnelling as a probe of half metallic ferromagnetism in mixed-valence manganites (1999) *J. Magn. Magn. Mat.*, 198–199, p. 1–5.
17. Davis A. H., Bussmann K. Organic luminescent devices and magnetoelectronics (2003) *J. Appl. Phys.*, 93, p. 7358–7361. Doi:10.1063/1.1540174.
18. Li F., Li T., Guo X. Vertical Graphene Spin Valves Based on $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ Electrodes (2014) *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6, p. 1187–1192. Doi:10.1021/am404866r.
19. Hueso L. E., Pruneda J. M., Ferrari V., Burnell G., Valdés-Herrera J. P., Simons B. D., Littlewood P. B., Artacho E., Fert A., Mathur N. D. Transformation of spin information into large electrical signals using carbon nanotubes (2007) *Nature*, 445, p. 410–413. Doi:10.1038/nature05507.
20. Zheng B., Binggeli N. Influence of the interface atomic structure on the magnetic and electronic properties of $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{SrTiO}_3(001)$ heterojunctions (2010) *Phys. Rev. B*, 82, 245311. Doi:10.1103/PhysRevB.82.245311.
21. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals (1993) *Phys. Rev. B*, 47, p. 758.
22. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium (1994) *Phys. Rev. B*, 49, p. 14251.
23. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set (1996) *Comput. Mat. Sci.*, 6, p. 15.
24. Martin M. C., Shirane G., Endoh Y., Hirota K., Moritomo Y., Tokura Y. Magnetism and structural distortion in the $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ metallic ferromagnet (1996) *Phys. Rev. B*, 53, p. 4285–4291.
25. Tsui F., Smoak M. C., Nath T. K., Eom C. B. Strain-dependent magnetic phase diagram of epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ thin films (2000) *Appl. Phys. Lett.*, 76, pp. 2421–2423. Doi:10.1063/1.126363.
26. Ma C., Yang Z., Picozzi S. Ab initio electronic and magnetic structure in $\text{La}_{0.66}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$: strain and correlation effects (2006) *J. Phys.: Condens. Matter*, 18, p. 7717–7728. Doi:10.1088/0953-8984/18/32/019.
27. Poggini L., Ninova S., Graziosi P., Mannini M., Lanzilotto V., Cortigiani B., Malavolti L., Borgatti F., Bardi U., Totti F., Bergenti I., Dediu V. A., Sessoli R. A Combined Ion Scattering, Photoemission, and DFT Investigation on the Termination Layer of a $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ Spin Injecting Electrode (2014) *J. Phys. Chem. C*, 118 (25), p. 13631–13637. Doi:10.1021/jp5026619.
28. Kuzubov A. A., Kovaleva E. A., Avramov P., Kuklin A. V., Mikhaleva N. S., Tomilin F. N., Sakai S., Entani S., Matsumoto Y., Naramoto H. Contact-induced spin polarization in BNNT(CNT)/TM (TM=Co, Ni) nanocomposites (2014) *Journal of Applied Physics*, 116, 084309. Doi: 10.1063/1.4894157.

© Ковалева Е. А., Кузубов А. А.,
Куклин А. В., Михалев Ю. Г., Попов З. И., 2015

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВАРКА КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОДАМИ, СОДЕРЖАЩИМИ НАНОПОРОШКИ**

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
E-mail: genry@icm.krasn.ru. Spin-code 2974-6220

При изготовлении конструкций летательных аппаратов из алюминиевых сплавов применяется сварка, физическая сущность которой заключается в получении неразъемного соединения путем расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Однако при этом структура сварного шва и соединяемых деталей в области влияния нагрева укрупняется, что приводит к уменьшению механических свойств сварного изделия. Известно, что металлоизделия с мелкокристаллической структурой обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с крупнокристаллическими. При этом в практике литейного производства с целью измельчения структуры литых изделий применяется модифицирование, суть которого заключается во введении в жидкий металл с помощью лигатур веществ, служащих центрами кристаллизации. Однако возможности таких средств модифицирования достигли пределов, и в последние годы нашел применение новый способ модифицирования с использованием нанопорошков (НП) химических соединений (нитриды, карбиды, бориды, оксиды), который дает более высокий эффект повышения механических свойств литых изделий. Имея в виду тот факт, что механизмы кристаллизации литых изделий и сварного шва идентичны, технологию модифицирования жидких сплавов использовали для измельчения структуры сварного шва при изготовлении сварной конструкции летательного аппарата из листов на примере алюминий-магниевого сплава АМг6 с применением сварочных прутков, содержащих НП. Результаты испытаний вырезанных из сваренной конструкции образцов показали, что σ_b металла в области сварного шва при сварке прутком, содержащим НП BN, составляет 333 МПа, LaB₆ – 338 МПа и TiCN – 345 МПа. Эти значения оказались соответственно выше на 4,1, 5,6 и 7,8 %, чем у образцов из сплава АМг6 (320 МПа), сваренных по стандартной технологии электродом из этого же сплава. Разработка защищена патентами Российской Федерации.

Ключевые слова: летательные аппараты, алюминиевые сплавы, сварка.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 735–742**MANUFACTURING TECHNOLOGY AND WELDING
OF ALUMINUM ALLOYS ELECTRODES CONTAINING NANOPOWDERS**

G. G. Krushenko

Institute Computational Modeling SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru. Spin-code 2974-6220

In the manufacture of aircraft structures made of aluminum alloys used is the welding, physical essence of which is to obtain a permanent connection by melting and co-crystallization of the welding electrode materials and parts to be joined. However, while the structure of the weld and the joined parts of the influence of heat coarsen, which leads to a reduction in the mechanical properties of the welded articles. It is known that metal with fine-grained structure has higher mechanical properties compared to coarse. Thus in practice, for the purpose of foundry castings structure refinement modification is used, the essence of which consists in introducing alloys into the liquid metal using substances which serve as crystallization centers. However, the possibility of modifying such agents has reached the limits in recent years and a new method of modifying the application using nanopowders (NP) chemical compounds (nitrides, carbides, borides, oxides), which gives a high effect of enhancing the mechanical properties of the molded articles has been found. It should be beared in mind that the mechanism of crystallization of molded articles and weld identical technology modifying liquid alloy was used to grind the weld structure in the manufacture of a welded structure of the aircraft from the example sheets of aluminum-magnesium alloy AMg6 with welding rods containing NP. The test results are cut from the welded structure samples showed that σ metal at the weld joint during the welding rod comprising NP

BN, is 333 MPa, LaB₆ – 338 MPa, TiCN – 345 MPa. These values were higher than 4.1, respectively; 5.6 and 7.8 %, than the samples have AMg6 alloy (320 MPa), welded by the standard electrode of the same alloy. The development is protected by patents of the Russian Federation.

Keywords: aircraft, aluminum alloys, welding.

Введение. При изготовлении конструкций из алюминиевых сплавов, использующихся в аэрокосмическом машиностроении, применяются разного рода способы и средства выполнения неразъемных соединений, включая и сварку [1; 2].

Физическая сущность сварки металлоизделий заключается в получении неразъемного соединения путем расплавления и совместной кристаллизации материалов сварочного электрода и соединяемых деталей. Однако при этом структура сварного шва и соединяемых деталей в области влияния нагрева укрупняется (рис. 1 [3]), что приводит к уменьшению механических свойств сварного изделия.

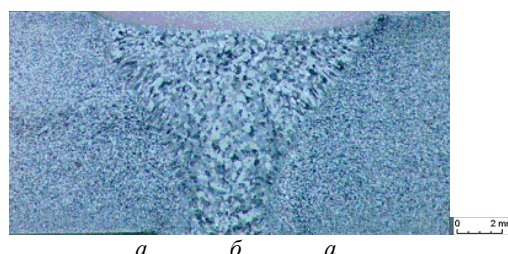


Рис. 1. Структура сварного соединения листов из сплава АМг5:
а – основной материал; б – сварной шов [3]

При этом в многочисленных работах однозначно установлено, что металлоизделия с более измельченной кристаллической структурой обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с крупнокристаллическими. Такое поведение поликристаллических металлов описывается классическим соотношением Холла–Петча (Hall-Petch dependence) [4; 5]:

$$H_v(\sigma_T) = H_0(\sigma_0) + \frac{k}{\sqrt{D}},$$

где H_v – твердость материала; σ_T – предел текучести; H_0 – твердость тела зерна; σ_0 – внутреннее напряжение; препятствующее распространению пластического сдвига в теле зерна; k – коэффициент пропорциональности; D – размер зерна. Из приведенной формулы видно, что с уменьшением размера зерна происходит увеличение прочности материала.

Модифицирование нанопорошками. В то же время общеизвестно, что с целью измельчения структуры, например, литых изделий из различных сплавов применяется так называемое модифицирование [6–8], суть которого заключается во введении в жидкий металл небольших количеств веществ, либо служащих центрами кристаллизации, либо блокирующих рост формирующихся на зародышах кристаллических образований. В ряде случаев имеют место оба процесса, они либо идут одновременно, либо в последовательности: зарождение центров кристаллизации → блокирование роста кристаллов.

Существует достаточно большое количество средств и способов модифицирования – в основном путем введения модифицирующих добавок в жидкий металл лигатурами (сплав, состоящий из основы готовящегося сплава и модифицирующей добавки). Однако возможности таких средств модифицирования практически достигли своих пределов, и в последние годы нашел применение новый способ модифицирования с использованием нанопорошков (НП) химических соединений, по применению которого автором с коллегами выполнен в производственных условиях большой объем работ.

В качестве модификаторов алюминиевых литейных и деформируемых сплавов, чугуна и стали опробовано более 20-ти соединений, в частности: нитрид алюминия AlN; оксид алюминия Al₂O₃; карбид бора B₄C; нитрид бора BN, карбонитрид хрома Cr₃C_{1,6}N_{0,4}; нитрид гафния HfN; диборид гафния HfB₂; гексаборид лантана LaB₆; карбид кремния SiC; нитрид кремния Si₃N₄; нитрид тантала TaN; карбонитрид титана Ti_xC_yN_z; оксикарбонитрид титана Ti_xC_yN_zO_i; нитрид титана TiN; двуокись титана TiO₂; карбид ванадия VC; карбонитрид ванадия V_xC_yN_z; нитрид ванадия V_{0,75}N_{0,25}; а также смеси НП: AlN + TiN; BN + B₄C; SiC + B₄C и ряд других. Эти соединения относятся к промежуточным фазам, характерной особенностью которых является высокая степень устойчивости, неметаллический характер и высокая температура плавления (в диапазоне 2273–3273 К). В результате введения НП B₄C, SiC, Ti_xC_yN_z, TaN и смеси B₄C + BN в алюминиевые литейные сплавы АК7, АК12, АК9ч, АК7ч, АК7Ц9 и др. измельчается макро- и микроструктура, что приводит к увеличению σ_b отливок на 2,5–19,3 % и δ – в 1,5–7,3 раза. В результате введения НП B₄C в сплавы АК7ч и АМ5 при получении из них деталей жидкой штамповкой повышается удлинение δ соответственно на 50 и 19 % при сохранении уровня σ_b . При введении НП SiC, B₄C, BN, LaB₆, TaN, Ti_xC_yN_z, TiCN, TiN, TiO₂, V_xC_yN_z, смеси AlN + BN, смеси HfN + HfB₂ в алюминиевые деформируемые сплавы при литье полунепрерывным способом слитков диаметром 190 мм из сплава Д16, диаметрами 300, 420 и 500 мм из сплава АМг6 и диаметром 480 мм из сплава Д1, происходит измельчение зерна в 1,7–20 раз, что приводит к повышению механических свойств отпрессованных из них профилей различного сечения: σ_b – на 2,5–8,8 %; $\sigma_{0,2}$ – на 2,0–16,1 %; δ – на 11,8–31,0 %. Кроме того, установлен эффект модифицирования с помощью НП чугунов СЧ15, ИСЦ, СЧЦ-1С и ИЧХ-12М и связанный с этим рост свойств отливок. Полученные результаты изложены в целом ряде статей и монографий [9–14] и защищены 26-ю патентами, начиная с 1981 г. [15] и по 2013 г. [16].

Нанопорошки представляют собой сверхмелкозернистые кристаллические или аморфные образования

с размерами частиц, не превышающими 100 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), которые обладают уникальными физико-химическими свойствами и механическими характеристиками, существенно отличающимися от таковых для материалов того же химического состава в массивном состоянии. Причина уникальности свойств НП заключается в том, что количество атомов в их поверхностном слое и в объеме оказывается соизмеримыми [17]. Вследствие малых размеров и высокой реакционной способности НП и возникла идея их введения в металлические расплавы в качестве модификаторов. Однако существующие способы введения в металлические расплавы порошкообразных добавок не могли быть приняты при использовании НП вследствие их особых свойств по сравнению с более крупными порошками. Так, частицы НП легко «слипаются», их окисление начинается при сравнительно низких температурах, и, что особенно важно для выполнения роли центров кристаллизации, они плохо смачиваются жидким металлом, что является основанием для начала формирования кристаллов. Кроме того, несмотря на высокую плотность (от 1380 кг/м^3 TaN до 2510 кг/м^3 B_4C), НП легко образуют в воздухе пылевидную взвесь, при определенных условиях самовозгорающуюся и даже взрывоопасную. Все это делает практически невозможным прямое введение НП в расплавы, поэтому был разработан принципиально новый способ их введения [18; 19], блокирующий перечисленные выше негативные явления.

Изготовление модифицирующих прутков. С этой целью в тонкостенный алюминиевый контейнер ($\varnothing 165 \text{ мм}$, $h = 235 \text{ мм}$, толщина стенки 2 мм) засыпали плакированные нанопорошком: а) частицы алюминия или алюминиевых деформируемых сплавов либо в виде гранул размером 1,5–3,0 мм, получаемых из сплавов Д1 или Д16 методом центробежной разливки, либо в виде крупки первичной марки АКП (ТУ 48-5-38-78) с размерами частиц в диапазоне 0,02–0,04 мм, получаемой из алюминия марки А5 методом распыления, либо «сечки» – частиц алюминия диаметром 2,0 мм, высотой 1,5–2,0 мм, получаемых нарезанием алюминиевой проволоки. Затем отверстие в контей-

нере закрывали алюминиевой крышкой, производили ее завальцовку, подвергали контейнер вращению в установке с эксцентричными осями. После чего его помещали в контейнер гидравлического пресса и с усилием прессования 100–120 тс со скоростью 3,5 см/с прессовали прутки диаметром от 5 до 9,5 мм, особенностью которых оказалось их волокнистое внутреннее строение при тонкой оболочке (десятые доли мм) (рис. 2, 3).

Волокнистое строение прутка объясняется тем, что из-за нахождения частиц НП на поверхности частиц алюминия в процессе экструзии они деформировались изолированно друг от друга, что подтверждается результатами микроскопического изучения поверхности как плакированных частиц алюминия, так и волокон. Оказалось, что волокна полностью покрыты прочно внедрившимися в их поверхность частицами НП. Это наблюдение свидетельствует, во-первых, о большом количестве частиц НП в прутках и, во-вторых, об их достаточно равномерном распределении в их объеме, что гарантирует получение равномерно измельченной структуры в объеме литой детали. В прутках $\varnothing 9,5 \text{ мм}$ насчитывалось от 1100 до 1200 волокон с площадью сечения в пределах 0,005–0,075 мм^2 . Расчет показал, что длина таких волокон в зависимости от размера частиц алюминия находилась в интервале 400–3200 мм. От размеров прессуемых частиц алюминия, т. е. от площади их поверхности, зависит содержание НП в объеме прутка, и чем частицы меньше, тем суммарная площадь находящихся в объеме контейнера частиц алюминия больше, следовательно, в прутке будет содержаться больше НП. Результаты взвешивания показали, что содержание НП в прутках находилось в пределах 1,5–2,7 масс. %. Полученные прутки служили носителем модификатора: при их введении в расплав алюминиевая матрица расплавлялась, и частицы НП оказывались в объеме жидкого металла, минуя контакт с атмосферой. Количество любого из НП, вводимого в любые исследуемые сплавы, не превышало 0,05 %, а в отдельных случаях – всего до тысячных долей процента. Расход прутка при этом составляет 20–25 кг на 1 т металла.

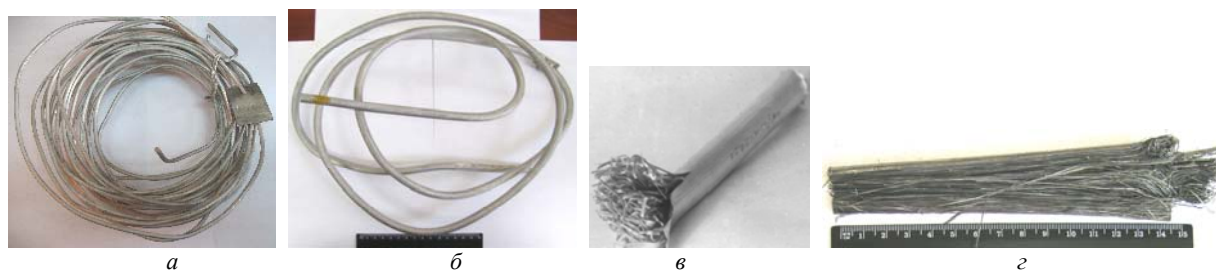


Рис. 2. Отпрессованные прутки:

а – $\varnothing 5,0 \text{ мм}$, $L = 15,0 \text{ м}$; б – $\varnothing 9,5 \text{ мм}$, $L = 4,0 \text{ м}$ (черная полоска в нижней части рисунка – линейка $L = 160 \text{ мм}$); в и г – фрагменты прутка со вспоротой оболочкой

Механизм наномодифицирования. В то же время, несмотря на достаточно обширный объем публикаций, описывающих измельчающее воздействие частиц НП тугоплавких химических соединений разного состава на структуру практически любых металлов и сплавов, что приводит к росту механических свойств получаемых из них литых изделий, к настоящему времени отсутствует четкое понимание механизма зародышеобразующего воздействия частиц наноразмерного диапазона. Например, в работе [20] сделана попытка разработки математической модели механизма зародышеобразующего воздействия НП, которая исходит из таких допущений, что частицы НП условного состава C_mB_m имеют условную сферически-симметричную форму, а в качестве сплава принят «модельный сплав» условного состава $A+B$. Кроме того, с целью упрощения расчетов принят ряд допущений. В результате проведенных расчетов авторы получили зависимость, описывающую условия «полного модифицирования» при разных дозах вводимого НП:

$$f_s = \frac{pv}{100} \left(\frac{r}{y_0} \right)^3,$$

где p – доля порошка, масс. % (от 0,01 до 0,1 масс. %); v – соотношение плотностей сплава и порошка (не оговариваются); r – радиус кривизны частицы; y_0 – исходный размер частиц.



Рис. 3. Волокна, извлеченные из прутка, отпрессованного из композиции «частицы алюминия + НП»

Авторы считают, что при $f_s > 1$ имеет место полное модифицирование, т. е. вся структура закристаллизованного металла имеет глобулярную форму, а при $f_s < 1$ происходит неполное модифицирование, т. е. имеет место «смешанная» структура, а часть сплава $1 - f_s$ кристаллизуется в виде обычной дендритной формы. При этом авторы не приводят примеры реализации разработанных рекомендаций при использовании конкретных НП и сплавов.

В другой работе [21] механизм модифицирования НП рассматривается на неметаллическом материале с привлечением понятий синергетики на примере получения неорганического стеклопластика (композит на основе гидрооксипатита кальция $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$, применяемого в зубопротезировании) при введении в него НП карбонитрида титана $\text{TiC}_{0,3}\text{N}_{0,7}$. Однако и в этом исследовании, несмотря на обилие синергетической и термодинамической терминологии, фактически механизм зародышеобразующего воздействия НП не представлен.

При этом следует отметить, что в проведенных нами исследованиях было установлено практически одинаковая эффективность измельчающего воздействия всех используемых в работе НП – независимо от

их химического состава, типа кристаллической системы и класса, элементов симметрии, пространственной группы, структурного типа, периода решетки, плотности, температуры плавления и других рассмотренных параметров, все они обладали близким модифицирующим эффектом, несмотря на существенные структурные отличия.

В связи с этим возникло предположение, что зарождающая способность частиц НП может определяться каким-то одним общим для всех фактором, не зависящим напрямую от перечисленных параметров. Анализ показал, что одинаковым для всех видов НП является способ изготовления модифицирующих композиций – путем совместного прессования частиц алюминия и частиц НП, а также способ введения прессованных композиций в расплав. О том, что это эти условия, по-видимому, играют определяющую роль, по крайней мере, в процессе модифицирования алюминия и его сплавов, свидетельствуют данные эксперимента (во всех описываемых исследованиях количество вводимого во все изученные сплавы НП не превышало 0,05 масс. %), в котором макрозерно сплава Д16 измельчалось в большей степени в результате введения в него прутка $\varnothing 9,5$ мм, отпрессованного из гранул и НП в нагретом до 653–673 К контейнере, по сравнению с эффектом от введения прутка, отпрессованного без нагрева. Так, размер макрозерна при модифицировании прутком, содержащим НП SiC, оказался меньше на 86,7 %, чем в случае использования холоднопрессованного прутка. В случае применения таких же прутков, но содержащих НП BN, зерно уменьшилось на 75,0 %.

Можно полагать, что универсальность модифицирующего воздействия НП на различные металлы и сплавы связана со свойствами используемых нанопорошков. Во-первых, все они имеют высокую температуру плавления, во-вторых, они не обладают высокой реакционной способностью, в-третьих, они обладают высокой седиментационной устойчивостью в жидкостях. Если значение двух первых свойств достаточно понятно, то относительно третьей характеристики можно сказать следующее. Даже если вводимые в металлические расплавы модифицирующие агенты по известному набору характеристик [6; 7] отвечают соответствующим требованиям, то не во всех случаях они работают достаточно эффективно из-за оседания под действием силы тяжести. Частицы же НП обладают исключительно высокой седиментационной устойчивостью из-за своих малых размеров (до 100 нм) и высокой удельной поверхности, что еще в 1905 г. установлено А. Эйнштейном [22], который показал, что для частиц размером до 1 мкм энергии броуновского движения достаточно для того, чтобы они находились в постоянном движении и не оседали под действием силы тяжести. Поэтому частицы НП, можно сказать, обладают двойным модифицирующим воздействием: во-первых, они служат центрами кристаллизации, а во-вторых, будучи весьма многочисленными по количеству и находясь длительное время во взвешенном состоянии, блокируют диффузию соответствующих атомов (кластеров, блоков) к зарождающимся и растущим кристаллам, что, в конечном

счете, и способствует формированию мелкокристаллической структуры литых изделий. Кроме того, как было нами установлено и отмечалось выше [23], частицы НП могут упрочнять присутствующие в расплавах интерметаллические соединения. Все эти эффекты и ведут к повышению механических свойств тех же литых изделий.

По-видимому, в результате прессования композиции, состоящей из частиц НП, обладающих высокой твердостью, и из пластичного алюминия, при прохождении отверстия фильеры, где возникают большие усилия (согласно расчетам – в пределах 300–800 МПа) в связи с существенным уменьшением площади сечения прессуемого материала – с $\varnothing$ 165 мм алюминиевого контейнера ($F_{\text{сеч}} = 21382,15 \text{ мм}^2$) до $\varnothing$ фильеры от 5,0 мм ($F_{\text{сеч}} = 19,635 \text{ мм}^2$) до 9,5 мм ($F_{\text{сеч}} = 70,88 \text{ мм}^2$) – сечение уменьшается соответственно в 1089 и в 301 раз, вследствие развития высоких температур в области фильеры пластичность алюминия еще в большей степени увеличивается, что может привести к его «намазыванию» на поверхности частиц НП в виде монослоя, который впоследствии и служит подложкой для наращивания кристаллического материала при охлаждении и затвердевании металла. Если принять такое объяснение, то при этом на 100 % соблюдается принцип так называемого структурного и размерного соответствия, предложенного П. Д. Данковым еще в 1946 г. [24], согласно которому гетерогенное зарождение вызывают нерастворимые примеси, обладающие структурным сходством с кристаллизующимся веществом. Такие примеси называют изоморфными с кристаллизующимся веществом и модификаторами 2-го рода. Изоморфными являются примеси, периоды решетки которых отличаются от периода решетки кристаллизующегося металла не более чем на 10–15 % [25; 26].

Приведенные в работе [27] данные показали (см. таблицу), что параметры кристаллических решеток всех приведенных химических соединений больше чем на 10–15 % отличаются от параметров решетки алюминия и алюминиевых сплавов (гранцентрированный куб с параметром решетки 4,04 нм). Таким образом, можно считать, что зарождение центров кристаллизации начинается на монослое алюминия, сформировавшемся на частицах НП при прессовании

композиции «частицы алюминия + частицы нанопорошка».

Применение наномодификаторов при сварке.

Исходя из идентичности механизмов кристаллизации литых деталей и сварного шва, было решено опробовать сварку описанными выше прутками, прессование которых производилось по той же технологии, но с дополнительным введением в прессуемую композицию флюса АН-А4 (57,0 % KCl; 28,0 % BaF₂; 7,5 % LiF; 7,5 % AlF₃) [28].

Следует при этом отметить, что, если для изготовления подобных электродов, названных «пучковыми», применялась достаточно сложная технология [29], которая заключалась в нарезании сварочной проволоки на мерные заготовки, вкладывании их в кондуктор, обжимании в нагретом состоянии до плотного прилегания, вставлении их в муфту, которая вместе с прутками нагревается до сварочной температуры, после чего сваривается с прутками проковкой, далее изготовленный пучковый электрод вынимается из кондуктора и окунается в обмазку, которая является элементом, связующим отдельные прутки в электрод, то технология изготовления сварочных прутков, содержащих НП, оказывается значительно проще. И заключалась она практически в выполнении только двух операций: 1) смешивание частиц алюминия с частицами НП и с флюсом; 2) прессование этой композиции в сварочную проволоку (пруток).

Следует отметить, что применение нанопорошковых материалов при сварке описано в нескольких работах. Так, в работе [30] представлены результаты использования НП серебра с размерами частиц 5 и 100 нм в качестве «вставного материала» (using silver nanoparticles as an insert material) при лазерной сварке листов из магниевого сплава. При этом на листы предварительно наносили пасту, содержащую НП серебра, после чего их нагревали до 100 °С в течение 60 с с целью испарения пасты. Затем листы накладывали друг на друга сторонами, плакированными магниевыми наночастицами, и сканировали поверхность верхнего листа лазером, в результате чего частицы магниевого порошка расплавлялись, и при последующей кристаллизации магниевого расплава происходило прочное скрепление листов.

Характеристики кристаллического строения НП химических соединений, используемых в работе в качестве модификаторов [27]

Характеристика	Химическое соединение						
	Al ₂ O ₃	B ₄ C	BN	LaB ₆	SiC	Si ₃ N ₄	TaN
Кристаллическая система	Ромбоэдрическая		Кубическая		Гексагональная		
Периоды решетки, нм							
<i>a</i>	0,475	0,561	0,362	0,416	0,308	0,7818	0,519
<i>b</i>	–	–	–	–	–	–	–
<i>c</i>	1,299	1,212	–	–	1,008	0,5591	0,2910
<i>c/a</i>	2,734	2,165	–	–	3,27	0,7151	0,56

В другой работе, выполненной в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [31], сварку разнородных металлов (Al–Ti, Ti–сталь) проводили с помощью непрерывного CO₂-лазерного излучения с применением модифицирующих инокуляторов в виде порошков нитрида титана TiN и оксида иттрия Y₂O₃ (размер частиц до 20 мкм), частицы которых плакировали хромом. При этом так же, как и в предыдущей работе, предварительно приготовленная суспензия, содержащая эти порошки, наносилась на поверхность свариваемых пластин толщиной 1–2 мм. В результате применения этого способа структурные составляющие сварного шва измельчаются в 2–4 раза, а вместо игольчато-дендритной формируется дисперсная равноосная структура, выравниваются механические характеристики, уменьшаются размер шва и зона термического влияния, соответственно, повышаются механические свойства: временное сопротивление разрушению σ_b – в 1,23–1,35 раза, предел текучести $\sigma_{0,2}$ – в 1,8–2,0 раза и относительное удлинение δ – в 2,0–4,9 раза. По-видимому, меньший эффект повышения механических свойств, чем в случае сварки электродом, содержащим нанопорошки (размер частиц – нанометры), связан со значительно большими размерами частиц (микрон) применяемых порошков. Существенным недостатком описанных способов сварки является необходимость использования пасты и суспензии в качестве «магазинов» хранения порошков, с вытекающим из этого такого последствия, как сложность нанесения слоя именно такой толщины, которая обеспечит присутствие в сварочном шве требуемого количества порошка. Другой недостаток заключается в сложности закрепления пасты и суспензии на поверхностях, лежащих в трех измерениях. Эти недостатки отсутствуют при сварке электродами, содержащими НП.

Работа была выполнена в производственных условиях при изготовлении объемной конструкции из листового сплава АМг6 в связи с тем, что при ее сварке с использованием присадочной проволоки, изготовленной из этого же сплава, не всегда обеспечивалась требуемая прочность сварного соединения. Как показало металлографическое исследование, причиной этого оказался тот факт, что металл сварного шва отличался от металла листа более крупными зернами α -твердого раствора и более крупными выделениями β -фазы (Al₃Mg₂) по их границам. В работе применяли электрод с волокнистым строением диаметром 8 мм, содержащий порядка 2,0 % НП нитрида бора BN или гексаборида лантана LaB₆, или карбонитрида титана TiCN и 2,0 % флюса АН-А4. Сварку производили с помощью автоматической установки в среде аргона. Фрагменты сварки листов АМг6 приведены на рис. 4.



Рис. 4. Фрагменты сварки электродом, содержащим нанопорошок карбонитрида титана TiCN, листовой конструкции из сплава АМг6 толщиной:
а – 5,0 мм; б – 8,0 мм

Качество шва по требованиям приемочной документации оценивали по величине временного сопротивления разрушению σ_b при испытании вырезанных из сварной конструкции плоских образцов с размерами 15×50 мм. Результаты испытаний показали, что σ_b металла в области шва при сварке прутком, содержащим НП BN, составляет 333 МПа, НП LaB₆ – 338 МПа и НП TiCN – 345 МПа. Эти значения оказались соответственно выше на 4,1, 5,6 и 7,8 %, чем у образцов из сплава АМг6 (320 МПа), сваренных по стандартной технологии электродом из этого же сплава.

Изучение микроструктуры сварного шва показало, что в его объеме какие-либо дефекты отсутствуют. При этом зерно в свариваемом листе вытянуто вдоль прокатки, а его размеры лежат в интервале ~0,3–0,4 мм. Зерно в сварном шве – мелкое, равноосное, его размеры составляют ~0,01–0,03 мм, что в среднем меньше, чем в основном металле в 17,5 раза. Интерметаллидные фазы оказались в раздробленном состоянии. Можно полагать, что повышение σ_b связано не только с измельчением структуры шва и измельчением интерметаллидов, но и с дисперсионным упрочнением α -твердого раствора сплава тонкодисперсными частицами НП. Микротвердость основного металла и сварного шва одного уровня – 76,4–78,7 НВ (среднее – 77,55 НВ или 73,5 НВ), т. е. при сварке разрушение не происходит.

Сварка электродом, содержащим НП карбонитрида титана TiCN, была успешно применена для заварки трещины в ступице массивного винта станции газоочистки цеха технологических котлов целлюлозно-бумажного комбината. Заварку производили в среде аргона. Было установлено, что в металле шва и в околошовной зоне трещины отсутствовали, тогда как при наплавке принятой по технологии алюминиевой проволокой этот дефект зачастую присутствует [32].

В следующей серии работ было установлено, что в результате предварительной механоактивации композиции, состоящей из частиц алюминия и НП, и последующего ее прессования содержание НП (на примере НП TiN) в прутке увеличивается до 7,7 масс. % [16; 33], что в еще большей степени позволяет повысить скорость сварки при одновременном уменьшении расхода электродной проволоки.

Заключение. В результате выполненной в производственных условиях работы была установлена возможность измельчения структуры сварного шва и повышения механических свойств сварного изделия типа оболочки из листов алюминиево-магниевого сплава АМг6 с применением в качестве модификаторов нанопорошков химических соединений нитрида бора BN, гексаборида лантана LaB₆ и карбонитрида титана TiCN.

Библиографические ссылки

1. Пат. 2357841 Российская Федерация, С 2 МПК В 23 К 9/23; В 23 К 9/16; В 23 К 33/00. Способ дуговой сварки в инертных газах стыковых соединений разнородных алюминиевых сплавов / Алексеев В. В., Овчинников В. В., Грушко О. Е. и др. № 2006128314/02 от 03.08.2006, Бюл. № 16. 2009.

2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding // *Welding Journal*. 2009. Vol. 88, № 1. P. 28–31.
3. Паршин С. Г. Электродуговая сварка с применением активирующих флюсов. Самара : Самарский научный центр РАН, 2006. 380 с.
4. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel: III. Discussion of Results // *Proceeding of the Physical Society. Section B*. 1951. Vol. 64, № 9. P. 717–753.
5. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals // *Journal of Iron and Steel Institute*. 1953. Vol. 174. P. 25–28.
6. Модифицирование силуминов. Киев : АН УССР, 1970. 179 с.
7. Бондарев Б. И., Напалков В. И., Тарарышкин В. И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов. М. : Металлургия, 1979. 224 с.
8. Лепинских Б. М., Телицын И. И. Физико-химические закономерности модифицирования железуглеродистых расплавов. М. : Наука, 1986. 96 с.
9. Измельчение структуры сплава Д16 при модифицировании прутками с ультрадисперсными порошками / Г. Г. Крушенко [и др.] // *Цветная металлургия*. 1991. № 4. С. 8–10.
10. Повышение механических свойств алюминиевых литейных сплавов с помощью ультрадисперсных порошков / Г. Г. Крушенко [и др.] // *Литейное производство*. 1991. № 4. С. 17–18.
11. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.] Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.
12. Крушенко Г. Г. Нанопорошки химических соединений – средство повышения качества металлоизделий и конструкционной прочности // *Заводская лаборатория*. 1999. Т. 65, № 11. С. 42–50.
13. Упрочнение металлических, полимерных и эластомерных материалов ультрадисперсными порошками плазмохимического синтеза / М. Ф. Жуков [и др.] Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. 312 с.
14. Нанопорошковые технологии в машиностроении / В. В. Москвичев [и др.] ; Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2013. 186 с.
15. А. с. 831840 SU Al₁, МПК⁵ С 22 С1/06. Способ модифицирования литейных алюминиевых сплавов эвтектического типа / Г. Г. Крушенко, Ю. М. Мусоханов, И. С. Ямских и др. № 2831160 от 17.10.1979, Бюл. № 19. 1981.
16. Пат. 2475334 РФ С 2 В 22 F 3/20; С 22 С 1/06; В 22 F 1/00; С 22 С 21/04. Способ получения модификатора для доэвтектических алюминий-кремниевых сплавов / Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. № 2011122498/02 от 02.06.2011, Бюл. № 5. 2013.
17. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М. : Атомиздат, 1977. 264 с.
18. Пат. РФ 2475550 С 1 С 22 С 1/06; С 22 С 21/02; С 22 В 9/10. Способ модифицирования алюминий-кремниевых сплавов / Крушенко Г. Г. № 2011130628 от 21.07.2011, Бюл. № 5. 2013.
19. Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. Модифицирование алюминиевых сплавов нанопорошками // *Нанотехника*. 2007. № 4. С. 58–64.
20. Черепанов А. Н., Борисов В. Т. К теории гетерогенного зародышеобразования на ультрадисперсных сферических частицах // *ДАН*. 1996. Т. 351, № 6. С. 783–785.
21. Седельников В. В. Структурообразование кристаллизующихся систем при модифицировании их ультрадисперсными порошками // *Литейное производство*. 2005. № 1. С. 2–5.
22. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen // *Annalen der Physik*. 1905. В 17. S. 549–560.
23. Крушенко Г. Г., Балашов Б. А. Упрочнение частиц TiAl₃ в алюминиевом композиционном материале // *Литейное производство*. 1995. № 10. С. 16–17.
24. Данков П. Д. Кристаллохимический механизм взаимодействия поверхности кристалла с чужеродными элементарными частицами // *ЖФХ*. 1946. Т. 20, вып. 8. С. 853–867.
25. Близнаков Г. М. Адсорбция посторонних примесей и механизм роста кристаллов // *Кристаллография*. 1959. Т. 4, № 2. С. 150–156.
26. Портнов В. Н. Влияние примесей на скорость роста граней кристаллов из раствора. Нижний Новгород : Издательство Нижегород. гос. ун-та, 2013. 166 с.
27. Нараи-Сабо И. Неорганическая кристаллохимия. Будапешт : Издательство АН Венгрии, 1969. 504 с.
28. Пат. 2429958 РФ С 2 МПК В 23 К 35/40. Способ изготовления электродной проволоки для сварки алюминиевых сплавов / Крушенко Г. Г. № 2009131289/02 от 17.08.2009, Бюл. № 27. 2011.
29. А. с. 87411 SU Класс 21h, 30.6. Способ изготовления пучковых электродов / Н. В. Бродович, А. В. Обухов. № 411121 от 15.12.1949.
30. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 536. P. 143–151.
31. Воздействие высококонцентрированных потоков энергии на материалы с целью изменения их физико-химических свойств и улучшения эксплуатационных характеристик / Сибирское отделение РАН. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. С. 138–139.
32. Балашов Б. А., Крушенко Г. Г., Лепихин А. М. Применение модифицирующего прутка Al–Ti–Be в сварке алюминия и алюминиевых сплавов // *Современные проблемы сварочной науки и техники : материалы Рос. науч.-техн. конф. Пермь : ТПИ. 1995. Ч. I. С. 197–198.*
33. Крушенко Г. Г., Фильков М. Н. Технология получения алюминиевого композита с повышенным содержанием упрочняющих нанопорошков // *Вестник СибГАУ*. 2011. № 1 (34). С. 139–142.

References

1. Alekseev V. V., Ovchinnikov V. V., Grushko O. E. et al. *Sposob dugovoy svarki v inertnykh gazakh stykovykh soedineniy raznorodnykh alyuminievyykh spлавov* [Method of arc welding in inert gases butt joints of dissimilar aluminum alloys]. Patent RF, no. 2357841, 2009.
2. Hartman D. A., Davé V. R., Cola M. J. In-process quality assurance for aerospace welding. *Welding Journal*. 2009, Vol. 88, No. 1, P. 28–31.

3. Parshin S. G. *Elektrodugovaya svarka s primeneniem aktiviruyushchikh flyusov* [Arc welding using activating fluxes]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2006, 380 p.
4. Hall E. O. The deformation and Ageing of Mild Steel: III. Discussion of Results. *Proceeding of the Physical Society. Section B*. 1951, Vol. 64, No. 9, P. 717–753.
5. Petch N. J. The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of Iron and Steel Institute*. 1953, Vol. 174, P. 25–28.
6. *Modifitsirovanie siluminov*. [Inoculation of the materials silumina]. Kiev, AN USSR Publ., 1970, 179 p.
7. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modifitsirovanie alyuminievykh deformiruemyykh splavov*. [Inoculation of wrought aluminium alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 224 p.
8. Lepinskiy B. M., Telicyn I. I. *Fiziko-khimicheskie zakonomernosti modifitsirovaniya zhelezo-uglerodistykh rasplavov*. [Physico-chemical principles of inoculation of iron-carbon melts]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 96 p.
9. Krushenko G. G., Fil'kov M. N., Balashov B. A. i dr. [Refinement of the structure of the alloy D16 when modifying the bars with ultra-fine powders]. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1991, No. 4, P. 8–10 (In Russ.).
10. Krushenko G. G., Balashov B. A., Vasilenko Z. A. et al. [Improvement of mechanical properties of aluminum casting alloys with ultrafine powders]. *Liteynoe proizvodstvo*. 1991, No. 4, P. 17–18 (In Russ.).
11. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Krushenko G. G. et al. *Plazmokhimicheskiy sintez ul'tradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modifitsirovaniya metallov i splavov*. [Plasmachemical synthesis of ultradispersed powders and their application for modification of metals and alloys]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN Publ., 1995, 344 p.
12. Krushenko G. G. [Nanopowders of chemical compounds is a means of improving the quality of the metal and structural strength]. *Zavodskaya laboratoriya*. 1999, Vol. 65, No. 11, P. 42–50 (In Russ.).
13. Zhukov M. F., Cherskiy I. N., Krushenko G. G. et al. *Uprochnenie metallicheskiy, polimernyykh i elastomernyykh materialov ul'tradispersnykh poroshkami plazmokhimicheskogo sinteza*. [Hardening of metallic, polymeric and elastomeric materials ultrafine powders plasmachemical synthesis]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya izdatel'skaya firma RAN Publ., 1999, 312 p.
14. Moskvichev V. V., Krushenko G. G., Burov A. E. et al. *Nanoporoshkovyye tekhnologii v mashinostroenii*. [Nanopowder technology in mechanical engineering]. Krasnoyarsk, Sibirskiy federal'nyy universitet, 2013, 186 p.
15. Krushenko G. G., Musohranov Ju. M., Jamskiy I. S. et al. *Sposob modifitsirovaniya liteynykh alyuminievykh splavov evtekticheskogo tipa* [The method of inoculation of cast aluminum alloys of eutectic type]. Patent RF, no. 831840, 1981.
16. Krushenko G. G., Fil'kov M. N. *Sposob polucheniya modifikatora dlya doevtekticheskikh alyuminievo-kremnievykh splavov* [The way to obtain a modifier for hypoeutectic aluminum-silicon alloys]. Patent RF, no. 2475334, 2013.
17. Morohov I. D., Trusov L. I., Chizhik S. P. *Ul'tradispersnye metallicheskie sredy* [Ultrafine metal environment]. Moscow, Atomizdat Publ., 1977, 264 p.
18. Krushenko G. G. *Sposob modifitsirovaniya alyuminievo-kremnievykh splavov*. [The method of inoculation of aluminum-silicon alloys]. Patent RF, no. 2475550, 2013.
19. Krushenko G. G., Fil'kov M. N. [Inoculation of aluminium alloys by nanopowders]. *Nanotekhnika*. 2007, No. 4, P. 58–64 (In Russ.).
20. Cherepanov A. N., Borisov V. T. [The theory of heterogeneous nucleation on ultrafine spherical particles]. *DAN*. 1996, Vol. 351, No. 6, P. 783–785 (In Russ.).
21. Sedel'nikov V. V. [The formation of the crystallizing systems by modifying their ultrafine powders]. *Liteynoe proizvodstvo*. 2005, No. 1, P. 2–5 (In Russ.).
22. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*. Mai 1905. B 17. P. 549–560.
23. Krushenko G. G., Balashov B. A. [Hardening of TiAl₃ particles in aluminum composite material]. *Liteynoe proizvodstvo*. 1995, No. 10, P. 16–17 (In Russ.).
24. Dankov P. D. [Crystal-chemical mechanism of interaction between the crystal surface with alien elementary particles]. *ZhFH*. 1946, Vol. 20, No. 8, P. 853–867 (In Russ.).
25. Bliznakov G. M. [Adsorption of impurities and the mechanism of crystal growth]. *Kristallografiya*. 1959, Vol. 4, No. 2, P. 150–156 (In Russ.).
26. Portnov V. N. *Vliyanie primesey na skorost' rosta graney kristallov iz rastvora*. [The effect of impurities on the growth rate of the faces of the crystals from the solution]. Nizhniy Novgorod, Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosuniversiteta Publ., 2013, 166 p.
27. Narai-Sabo I. *Neorganicheskaya kristalloghiya* [Inorganic chemistry]. Budapesht, Izdatel'stvo AN Vengrii Publ., 1969, 504 p.
28. Krushenko G. G. *Sposob izgotovleniya elektrodnoy provoloki dlya svarki alyuminievykh splavov* [A method of manufacturing an electrode wire for welding of aluminium alloys]. Patent RF, no. 2429958, 2011.
29. Brodovich N. V., Obuhov A. V. *Sposob izgotovleniya puchkovykh elektrodov* [A method of manufacturing a beam-type electrodes]. Patent RF, no. 87411, 1949.
30. Ishak M., Maekawa K., Yamasaki K. The characteristic of laser welded magnesium alloy using silver nanoparticles as insert material. *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 536. P. 143–151.
31. *Vozdeystvie vysokokontsentrirannykh potokov energii na materialy s tsel'yu izmeneniya ikh fiziko-khimicheskikh svoystv i uluchsheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik*. Sibirskoe otdelenie RAN v 2007 godu. [The impact of highly concentrated streams of energy to materials to change their physical-chemical properties and improved performance. Siberian branch of the Russian Academy of Sciences in 2007]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN Publ., P. 138–139.
32. Balashov B. A., Krushenko G. G., Lepihin A. M. [The use of modifying rod Al-Ti-Be in the welding of aluminum and aluminum alloys] *Sovremennye problemy svarochnoy nauki i tekhniki: Materialy Rossiyskoy nauchno-tekhnich. konf. Ch. I*. [Modern problems of welding science and technology: Proceedings of the Russian scientific and tech. Conf. Part I]. Perm', TPI, 1995, P. 197–198.
33. Krushenko G. G., Fil'kov M. N. [Technology for producing aluminum composite material with a high content of reinforcing powders]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 1(34), P. 139–142 (In Russ.).

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПИРОВАНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ Si (100) НА СОРБЦИЮ И ДИФФУЗИЮ ЛИТИЯ**А. А. Кузубов^{1,2}, Н. С. Михалева^{1*}, З. И. Попов², П. О. Краснов³, К. М. Николаева¹¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50–38

³Сибирский государственный технологический университет

Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Марковского, 57

*E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com

В настоящее время перспективным анодным материалом нового поколения считается кремний, поскольку он имеет самую высокую теоретическую удельную емкость (4200 мАч/г). Однако одной из проблем, препятствующих широкому использованию данного материала, является медленная диффузия лития с поверхности кремния в объем, которая может быть решена с помощью модификации поверхности кремния. Проведено моделирование поверхностных процессов сорбции и диффузии лития в допированной поверхности Si (100) с помощью метода функционала плотности. В ходе исследования допирования Si (100) одиночными атомами B, Ga, Ge выявлено, что для всех выбранных нами допантов наиболее выгодны положения замещения кремния, а не адсорбции. Энергия связи допанта с пластиной кремния ослабевает в ряду от германия к галлию. Найдено, что атом бора замещает атом третьего слоя кремния, а германий и галлий занимают положение в первом слое. Тенденция первоначальной сорбции атомов лития в канале между димерами по сравнению с чистым материалом сохраняется и при допировании одиночными атомами B, Ga, Ge. Наблюдается значительное снижение (в случае бора) и увеличение (для галлия и германия) энергетических барьеров перехода атома лития по поверхности кремниевой пластины. Величины энергетических барьеров перехода L–U с поверхности в приповерхностные слои при допировании возрастают на 0,05 эВ, что свидетельствует о замедлении данной стадии. В результате работы было обнаружено, что допирование бором, галлием и германием (концентрация составляет 0,3 атомных %) поверхности Si (100) не оказывает значительного влияния на сорбционные и диффузионные параметры.

Ключевые слова: диффузия, литий, кремний, допирование, метод функционала плотности (DFT).

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 743–749**THEORETICAL STUDY OF Si (100) DOPING INFLUENCE
ON LITHIUM SORPTION AND DIFFUSION**А. А. Kuzubov¹, N. S. Mikhaleva^{1*}, Z. I. Popov², P. O. Krasnov³, K. M. Nikoleva¹¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Kirensky Institute of Physics SB RAS

50–38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Siberian State Technological University

57, Markovskogo Str., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation

*E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com

Currently, silicon is the most promising anode material for a new generation of lithium-ion batteries due to its very high theoretical specific capacity (4200 mAh/g). However, one of the problems hindering the wider use of this material is the slow diffusion of lithium from silicon surface into volume that can be solved by modifying silicon surface. The simulation of surface processes of sorption and diffusion of lithium in doped Si (100) was carried out by using the density functional method. In the study Si (100) doped with single atoms B, Ga, Ge, found that the silicon replacement compared to adsorption are more profitable for all dopants. The binding energy of dopant to silicon decreases from germanium to gallium. It was found that boron atom substitutes for the third layer of silicon, germanium and gallium occupy positions in the first layer. In comparison with the pure material the trend of initial lithium sorption in the channel

between silicon dimmers retain for Si (100) doped with single atoms of B, Ga, Ge. Energy barriers of lithium transition on silicon surface substantially reduce (in the case of boron) and increase (in the case of gallium and germanium). The energy barrier of transition from surface to surface layers L-U during the doping increases by 0.05 eV, this shows a moderation of the stage. According to the study, Si (100) doping with boron, gallium and germanium (concentration of 0.3 atomic %) has not significant influence on sorption and diffusion parameters.

Keywords: diffusion, lithium, silicon, doping, DFT.

Введение. Кинетика диффузии Li – вопрос перво-степенной важности для механического разрушения кремниевых электродов, обладающих самой высокой теоретической удельной емкостью 4200 мАч/г, потому что это существенно влияет на устойчивость материала к механическим напряжениям во время литиирования, и коэффициент диффузии Li является ключевым параметром, определяющим, насколько быстро в батарее протекает цикл «заряд–разряд» [1]. Согласно работе [2] лимитирующей стадией процесса является диффузия лития с поверхности кремния в приповерхностные слои, следовательно, нужно ускорить данную стадию.

Одним из основных методов модификации электрохимических свойств электродных материалов является допирование. Поскольку атомы легирующей примеси предпочтительно остаются на поверхности наноматериалов в связи с так называемым эффектом самоочищения [3], основной упор делается на повышение поверхностной интеркаляции лития при помощи легирования.

Для полупроводников IV группы в качестве допантов используют элементы III и V групп, для получения полупроводников *p*-типа и *n*-типа соответственно. Как уже упоминалось в [4], диффузия лития в объем типична для кремния *p*-типа, а для кремния *n*-типа она становится существенна только при высокой температуре.

Прежде всего, стоит упомянуть о том, что поверхность кремния (100) обладает реконструкцией, при которой соседние атомы кремния на поверхности за счет наличия свободных связей образуют структуры, называемые димерами. Димеры располагаются на поверхности кремния друг за другом линейно с образованием канавок между линиями димеров. Имеются экспериментальные и теоретические работы, посвященные исследованию структуры Si (100), допированной бором, фосфором, алюминием и галием (концентрация адатомов 0,5–1 монослоя), согласно которым атомы занимают подповерхностные слои (B, Al), поверхностные слои (димеры) (Ga, Al, P) [5–8]. При этом, за исключением случая легирования алюминием, когда он располагается в подповерхностных слоях, сохраняется реконструкция поверхности (2×1) [2], но с разной высотой и длиной димеров. Энергия допирования атомами бора и фосфора положительна в отличие от алюминия. Следовательно, термодинамически более выгодно легирование B и P. Стабильность структур уменьшается в ряду B > P > недопированная структура > объемный кристалл > Al > наносу [2].

В работе [9] авторами была изучена энергия сегрегации атомов бора и фосфора в зависимости от глубины расположения допанта в Si (100). Как оказалось,

оба допанта характеризуются сильной движущей термодинамической силой сегрегации (0,4–1,2 эВ), что соответствует ранним экспериментальным [10; 11] и теоретическим данным [8]. Таким образом, ожидается высокая концентрация легирующей примеси атомов вблизи поверхности, несмотря на низкую общую плотность легирования 10^{15} см^{-3} в образцах [9].

Согласно экспериментальным данным легирование кремния бором приводит к незначительным улучшениям в производительности кремниевого электрода с точки зрения циклоустойчивости, процессов заряда-разряда [12].

Влияние допирования Si (100), пассивированного водородом, на диффузию лития было изучено теоретически в работах [2; 9]. В случае допирования бором энергетический барьер перехода атома лития с поверхности в подповерхностный слой слегка увеличивается и составляет 0,96 эВ. В этом случае атому лития более выгодно располагаться на поверхности, чем в приповерхностном положении, и разница между двумя положениями составляет 0,61 эВ [2]. Это делает поверхностную интеркаляцию Li менее предпочтительной. В то время как легирование P и Al (димеры) вносит небольшие улучшения: энергетический барьер снижается до 0,83 эВ и разница между двумя состояниями уменьшается до 0,38–0,39 эВ. При этом по сравнению с нелегированной структурой снижение энергии активации составляет всего 0,05 эВ. Большее снижение энергетического барьера (до 0,48 эВ) наблюдается в случае допирования алюминием, когда атомы занимают подповерхностные слои.

В работе [9] авторами было отмечено, что литию энергетически выгодно располагаться на поверхности и подповерхностных слоях Si (100), допированного бором. В то время как для структуры, допированной фосфором, выгодны только поверхностные положения лития. Эта тенденция сохраняется для обеих структур с пассивацией поверхности водородом и без нее. Недопированная, пассивированная водородом поверхность (100) имеет энергию внедрения лития, близкую к структуре, допированной фосфором, в то время как недопированная, непассивированная поверхность (100) ведет себя аналогично легированной бором. Такое различие в поведении объясняется наличием поверхностных энергетических состояний в Si (100), допированном фосфором.

В качестве еще одного многообещающего допанта может выступать германий. Это связано с тем, что при сравнимых температурах коэффициент диффузии и растворимость лития в германии выше, чем в кремнии [13].

В работе [14] авторами было исследовано влияние содержания германия на диффузию лития в образцах монокристаллов твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ *p*-типа

($0 < x < 35$ атомных %). При понижении температуры с ростом содержания германия коэффициент диффузии и предельная растворимость лития резко уменьшаются. Причем с ростом температуры скорость изменения коэффициента диффузии лития в зависимости от состава твердого раствора уменьшается, что обусловлено влиянием упругих напряжений решетки, создаваемых изовалентными атомами германия.

Таким образом, планомерная модификация кремния может привести к созданию материалов, эффективных для использования в аноде литий-ионных батарей.

Целью работы являлась оценка влияния допирования поверхности Si (100) одиночными атомами B, Ga, Ge на параметры сорбции и диффузии лития.

Методика расчетов. Исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP [15–17] в рамках метода функционала плотности (DFT) [18; 19], с использованием базиса плоских волн и PAW-формализма [20; 21]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционного функционала PBE [22]. Для нахождения переходного состояния и энергетических барьеров при переходе атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (100) был применен метод упругой ленты (nudged elastic band) [23].

На начальном этапе работы была смоделирована элементарная кубическая ячейка кремния. При оптимизации ее геометрии для интегрирования по первой зоне Брлюэна (1BZ) эта зона автоматически разбивалась на сетку $12 \times 12 \times 12$, выбранную по схеме Монхорста-Пака [24]. Далее для изучения сорбции и диффузии атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (100) была смоделирована пластина кристаллографического направления (100) с реконструкцией обеих поверхностей $c(4 \times 2)$, которая представляет собой суперячейку $4 \times 4 \times 3$ с параметрами $a = 15,3724 \text{ \AA}$, $b = c = 21,54 \text{ \AA}$. В процессе моделирования суперячейки кремния задавался вакуумный промежуток $27 \text{ \AA}$ вдоль нормали к поверхности. Его величина подбиралась исходя из предположения, что при таком расстоянии соседние поверхности не будут взаимодействовать друг с другом. При нахождении оптимальной геометрии суперячейки, ввиду достаточно больших ее размеров, количество k -точек вдоль каждого из направлений составляло $2 \times 2 \times 1$.

Толщина пластинки подбиралась исходя из значений поверхностной энергии. Для пластины кремния толщиной $15,3724 \text{ \AA}$ значение поверхностной энергии равнялось $151,6 \text{ мэВ/\AA}^2$, что согласуется с рассчитанными другими авторами значениями $155,9 \text{ мэВ/\AA}^2$ [25] и $149,2 \text{ мэВ/\AA}^2$ [26]. Энергия обрезания плоских волн E_{cutoff} в расчетах была равна $245,3 \text{ эВ}$. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных $0,01 \text{ эВ/\AA}$.

Далее было проведено моделирование структур Si (100), допированных одиночными атомами B, Ga, Ge (рис. 1). При этом нами рассматривались два типа структур: с адсорбированным атомом на поверхности; с атомом, замещающим кремний на поверхности

и в приповерхностных слоях. Для нахождения наиболее выгодной структуры были рассчитаны энергии связи атома-допанта с пластиной Si (100) (табл. 1).

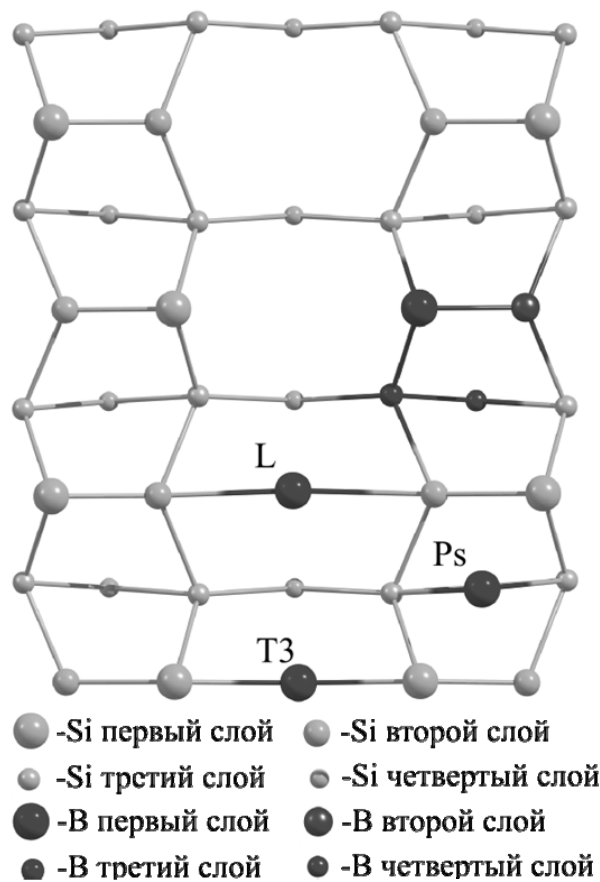


Рис. 1. Различные положения атома бора на поверхности и в приповерхностных слоях Si (100)

Для расчета связи атома с пластиной Si (100) использовалась следующая формула:

$$E = E_{\text{SiX}} - E_{\text{Si(100)}} - E_X, \quad (1)$$

где E_{SiX} – полная энергия системы Si (100), допированной атомом X ($X = \text{B, Ga, Ge}$); E_X – энергия одного атома допанта в его кристаллической решетке.

В случае замещения кремния допантом энергия связи рассчитывалась по формуле

$$E = E_{\text{SiX}} - E_{\text{Si(100)}} - E_X + E_{\text{Si}}, \quad (2)$$

где E_{Si} – энергия одного атома кремния в его кристаллической решетке.

Расчет энергии связи атома лития с поверхностью допированного Si (100) (табл. 2) реализовывался по формуле

$$E = E_{\text{SiLi}} - E_{\text{Si(100)}} - E_{\text{Li}}/n, \quad (3)$$

где E_{SiLi} – полная энергия системы допированного Si (100) с адсорбированным атомом лития; $E_{\text{Si(100)}}$ – полная энергия суперячейки допированного кремния с реконструированными поверхностями (100); E_{Li} – энергия одного атома лития в его кристаллической решетке.

Результаты и обсуждения. Исходя из полученных значений полной энергии, полученных в ходе оптимизации допированных структур кремния, для

всех выбранных нами допантов наиболее выгодны положения замещения кремния (табл. 1).

Энергия связи допанта с пластиной кремния ослабевает от германия к галлию. При этом атом бора замещает атом третьего слоя, а германий и галлий занимают положение в первом слое. Именно эти три структуры использовались для дальнейшего исследования сорбции и диффузии одиночного атома лития (табл. 2).

Согласно полученным значениям энергии связи атома лития с допированной пластиной Si (100) (табл. 2), тенденция первоначальной сорбции атомов лития в канале между димерами по сравнению с чистым материалом [27] сохраняется и при допировании.

Для оценки влияния допирования на диффузию лития были рассчитаны энергетические барьеры различных переходов по поверхности и в приповерхностных слоях допированного Si (100) (табл. 3, рис. 2, 3).

Таблица 1

Величины энергии связи атома-допанта с пластиной Si (100) в зависимости от положения на поверхности и типа допанта

Положение атома-допанта		Энергия связи атома-допанта с пластиной кремния, эВ		
		B	Ga	Ge
Адсорбция	L	0,029	3,074	3,223
	Ps	0,321	0,435	0,461
	T3	0,436	0,349	1,297
Замещение	1-й слой	-2,316	-1,838	-5,108
	2-й слой	-2,119	0,024	-4,972
	3-й слой	-2,429	-1,476	-4,746
	4-й слой – шестиугольник (Ps)	-2,059	-1,439	-4,709
	4-й слой – канал (T4)	-1,930	-1,497	-4,767
	7-й слой	-2,120	-1,454	-4,724

Таблица 2

Величины энергии связи атома лития с пластиной Si (100) в зависимости от положения на поверхности и типа допанта

Положение атома лития	Энергия связи атома лития с пластиной кремния, эВ		
	B	Ga	Ge
B2	-0,656	-1,018	-1,019
L	-1,189	-1,170	-1,172
Ps	-1,177	-0,995	-0,688
T3	-1,121	-1,229	-1,229
T4	-1,079	-1,098*	-1,104*
UB2	-0,746	-0,790	-0,790
UH	-0,793	-0,834	-0,834
TD	–	-0,370	-0,372

* Перешел в положение T3.

Таблица 3

Величина энергетического барьера перехода лития по поверхности и в приповерхностных слоях допированного Si (100) в зависимости от положения на поверхности и типа допанта

Направление миграции	Значение энергетического барьера перехода атома лития, эВ					
	B		Ga		Ge	
	В прямом направлении	В обратном направлении	В прямом направлении	В обратном направлении	В прямом направлении	В обратном направлении
B2–T4	0,00	0,41	–	–	–	–
L–T4	0,26	0,23	–	–	–	–
T4–T3	0,00	0,04	–	–	–	–
B2–T3	–	–	0,02	0,56	0,02	0,56
L–T3	–	–	0,39	0,45	0,39	0,45
B2–L	–	–	0,02	0,50	0,02	0,50
Ps–TD	–	–	0,62	0,62	0,62	0,62
L–U	0,96	0,65	0,94	0,59	0,94	0,59
T3–UH	1,13	0,80	1,13	0,73	1,13	0,73
UH–UB2	0,82	0,77	0,81	0,80	0,84	0,80
U–UB2	0,67	0,68	0,71	0,74	0,71	0,74
Ps–B2	0,40	0,00	0,32	0,29	0,30	0,28

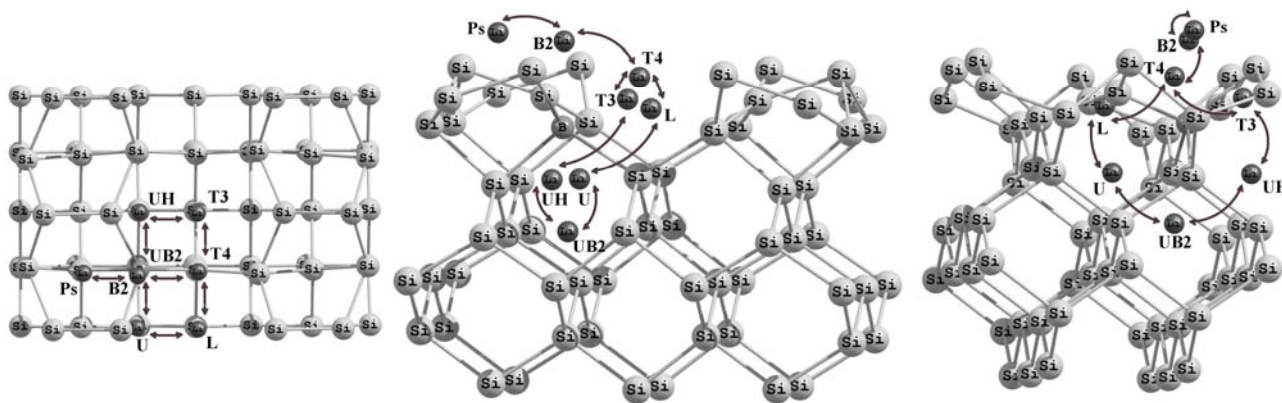


Рис. 2. Пути переходов лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (100), допированного бором

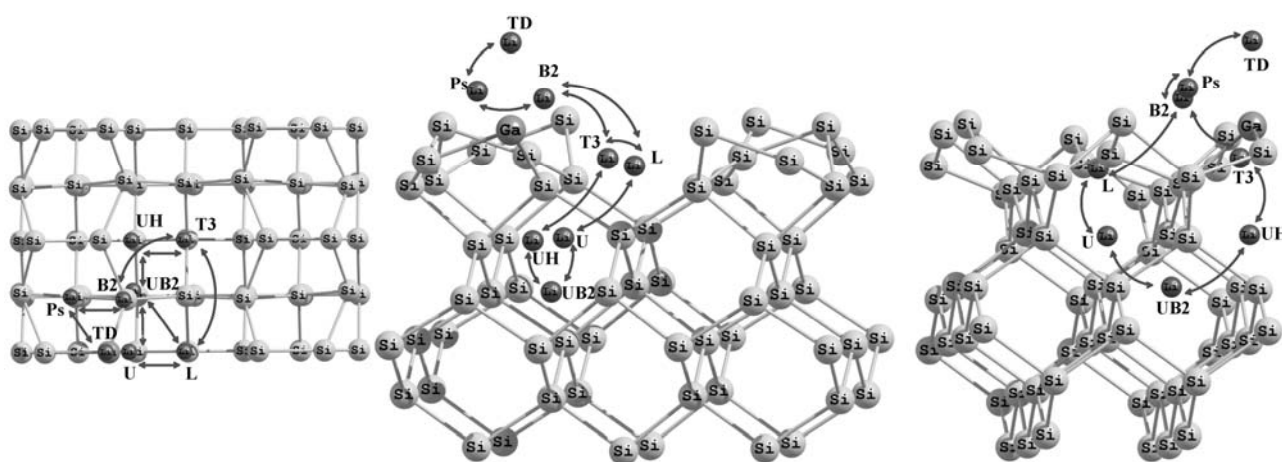


Рис. 3. Пути переходов лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (100), допированного галлием

Согласно полученным результатам, в случае допирования бором происходит значительное снижение энергетических барьеров перехода атома лития по поверхности кремниевой пластины. Для структур, допированных галлием и германием, наблюдается обратная картина, диффузия лития по поверхности замедляется. При этом литию предпочтительнее оставаться в наиболее выгодных сорбционных положениях (T3, L) ввиду высоких энергетических барьеров перехода (T3–B2, L–B2). Что же касается переходов с поверхности в приповерхностные слои (T3–UH, L–U), в то время как энергетический барьер перехода T3–UH уменьшился, для перехода L–U наблюдается обратная картина. Следовательно, допирование бором, галлием и германием при концентрации допанта 0,3 атомных % не решает проблему накопления на поверхности и медленной диффузии лития с поверхности кремния в объем.

Заключение. Проведена оценка влияния допирования поверхности Si (100) на параметры сорбционных и диффузионных процессов. Результаты работы определяют направление дальнейших исследований в этой области, заключающееся в поиске способа модифицирования поверхности Si (100) с целью избежания стадии накопления лития на поверхности

и ускорения диффузии лития с поверхности в объем. Полученные результаты показали, что модификация, заключающаяся в допировании поверхности Si (100) атомами бора, галлия и германия с целью увеличения скорости диффузии лития, при концентрации допанта 0,3 атомных % не может решить проблему высокого энергетического барьера, препятствующего легкому проникновению атомов лития в объем кремния через поверхность.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-02-31071, 14-02-31309.

Авторы выражают благодарность информационно-вычислительному центру (ИВЦ) Новосибирского государственного университета (Новосибирск), Институту компьютерного моделирования СО РАН (Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), компьютерному центру СФУ, а также НИВЦ МГУ «Лаборатории параллельных информационных технологий» (система СКИФ МГУ «Ломоносов») за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых были проведены все расчеты.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Scientific Fund, Project No. 14-02-31071, 14-02-31309.

The authors would like to thank Institute of Computational Modelling of SB RAS, Krasnoyarsk; Joint Supercomputer Center of RAS, Moscow; the HPC Research Department and Center of Equipment for Joint Use of Siberian Federal University, Krasnoyarsk; Siberian Supercomputer Center (SSCC) of SB RAS, Novosibirsk; and Laboratory of Parallel Information Technologies of Research Computing Center of Moscow State University (the SKIF MSU "Lomonosov" system) for providing the access to their supercomputers.

Библиографические ссылки

1. Inelastic hosts as electrodes for high-capacity lithium-ion batteries / K. Zhao [et al.] // *Appl. Phys.* 2011. Vol. 109. P. 016110.
2. Lithium transport at silicon thin film: Barrier for high-rate capability anode / B. Peng [et al.] // *J. Chem. Phys.* 2010. Vol. 133. P. 034701.
3. Doping semiconductor nanocrystals / S. C. Erwin [et al.] // *Nature*. 2005. Vol. 436. P. 91.
4. Eckhardt M., Kleine H., Fick D. Influence of doping on the bulk diffusion of Li into Si (100) // *Surf. Sci.* 1994. Vol. 319. P. 219.
5. Liu Z. H., Zhang Z. H., Zhu X. Atomic structures of boron-induced protrusion features on Si (100) surfaces // *Phys. Rev. B*. 2008. Vol. 77. P. 035322.
6. Sen P., Gupta B. C., Batra I. P. Structural studies of phosphorus induced dimers on Si (001) // *Phys. Rev. B*. 2006. Vol. 73. P. 085319.
7. Structural determination of the low-coverage phase of Al on Si (001) surface / J. Y. Park [et al.] // *J. Chem. Phys.* 2005. Vol. 122. P. 244723.
8. Surface segregation behavior of B, Ga, and Sb during Si MBE: Calculations using a first-principles method / J. Ushio [et al.] // *Phys. Rev. B*. 1998. Vol. 58. P. 3932.
9. Dopant Modulated Li Insertion in Si for Battery Anodes: Theory and Experiment / B. R. Long [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. 2011. Vol. 115. P. 18916.
10. Grove A. S., Leistiko O., Sah C. T. Redistribution of Acceptor and Donor Impurities during Thermal Oxidation of Silicon // *J. Appl. Phys.* 1964. Vol. 35. P. 2695.
11. Observation of phosphorus pile-up at the SiO₂-Si interface / J. S. Johannessen [et al.] // *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49. P. 4453.
12. Synthesis of boron-doped Si particles by ball milling and application in Li-ion batteries / S. Rousselot [et al.] // *J. of Power Sources*. 2012. Vol. 202. P. 262.
13. Санчишин Д. В., Львов П. Е., Светухин В. В. Определение термодинамических параметров растворимости примесей в кремнии и германии // *Ученые записки УлГУ. Серия физическая*. 2000. № 1(8). С. 10.
14. Атабаев И. Г., Матчанов Н. А., Бахранов Э. Н. Низкотемпературная диффузия лития в твердые растворы кремний-германий // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, вып. 12. С. 2140.
15. Kresse G. J. Hafner Ab initio molecular dynamics for liquid metals // *Phys. Rev. B*. 1993. Vol. 47. P. 558.
16. Kresse G. J. Hafner Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium // *Phys. Rev. B*. 1994. Vol. 49. P. 14251.
17. Kresse G. J. Furthmüller Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // *Phys. Rev. B*. 1996. Vol. 54. P. 11169.
18. Hohenberg H., Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas // *Phys. Rev. A*. 1964. Vol. 136. P. B864.
19. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations including Exchange and Correlation Effects // *Phys. Rev. A*. 1965. Vol. 140. P. A1133.
20. Blochl P. E. Projector augmented-wave method // *Phys. Rev. B*. 1994. Vol. 50. P. 17953.
21. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 59. P. 1758.
22. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalised gradient approximation made simple // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 77. P. 3865.
23. Henkelman G., Jónsson H. Improved tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle points // *J. Chem. Phys.* 2000. Vol. 113. P. 9978.
24. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // *Phys. Rev. B*. 1976. Vol. 13. P. 5188.
25. Angle-resolved photoemission studies of clean and adsorbed Si (001) surfaces: 2 × 1, c(4 × 2), 2 × 1-Na and 2 × 2-Ga/ Y. Enta, S. Suzuki, S. Kono // *Surf. Sci.* 1991. Vol. 242. P. 277.
26. Tabata T., Aruga T., Murata Y. Order-disorder transition on Si (001): c(4 × 2) to (2 × 1) // *Surf. Sci.* 1987. Vol. 179. P. L63.
27. Теоретическое исследование сорбции и диффузии атомов лития на поверхности и внутри кристаллического кремния / А. А. Кузубов [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. 2013. № 97, вып. 11. С. 732.

References

1. Zhao K., Pharr M., Vlassak J. J., Suo Z. J. Inelastic hosts as electrodes for high-capacity lithium-ion batteries. *Appl. Phys.* 2011, Vol. 109, P. 016110.
2. Peng B., Cheng F., Tao Z., Che J. Lithium transport at silicon thin film: Barrier for high-rate capability anode. *J. Chem. Phys.* 2010, Vol. 133, P. 034701.
3. Erwin S. C., Zu L., Haftel M. I., Efros A. L., Kennedy T. A., Norris D. J. Doping semiconductor nanocrystals. *Nature*. 2005, Vol. 436, P. 91.
4. Eckhardt M., Kleine H., Fick D. Influence of doping on the bulk diffusion of Li into Si(100). *Surf. Sci.* 1994, Vol. 319, P. 219.
5. Liu Z. H., Zhang Z. H., Zhu X. Atomic structures of boron-induced protrusion features on Si(100) surfaces. *Phys. Rev. B*. 2008, Vol. 77, P. 035322.
6. Sen P., Gupta B. C., Batra I. P. Structural studies of phosphorus induced dimers on Si(001). *Phys. Rev. B*. 2006, Vol. 73, P. 085319.
7. Park J. Y., Seo J. H., Whang C. N., Kim S. S., Choi D. S., Chae K. H. Structural determination of the

- low-coverage phase of Al on Si(001) surface. *J. Chem. Phys.* 2005, Vol. 122, P. 244723.
8. Ushio J., Nakagawa K., Miyao M., Maruizumi T. Surface segregation behavior of B, Ga, and Sb during Si MBE: Calculations using a first-principles method. *Phys. Rev. B.* 1998, Vol. 58, P. 3932.
 9. Long B. R., Chan M. K. Y., Greeley J. P., Gewirth A. A. Dopant Modulated Li Insertion in Si for Battery Anodes: Theory and Experiment. *J. Phys. Chem. C.* 2011, Vol. 115, P. 18916.
 10. Grove A. S., Leistiko O., Sah C. T. Redistribution of Acceptor and Donor Impurities during Thermal Oxidation of Silicon. *J. Appl. Phys.* 1964, Vol. 35, P. 2695.
 11. Observation of phosphorus pile-up at the SiO₂-Si interface / J. S. Johannessen [et al.] // *J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 49. P. 4453.
 12. Rousselot S., Gauthier M., Mazouzi D., Lestriez B., Guyomard D., Roué L. Synthesis of boron-doped Si particles by ball milling and application in Li-ion batteries. *Journal of Power Sources.* 2012, Vol. 202, P. 262.
 13. Sanchishhin D. V., L'vov P. E., Svetuhin V. V. [Determination of the thermodynamic parameters of the solubility of impurities in silicon and germanium]. *Scientific notes UIGU.* 2000, Vol. 1(8), P. 10.
 14. Atabaev I. G., Matchanov N. A., Bahranov Je. N. Low-temperature diffusion of lithium in silicon-germanium solid solutions. *Physics of solid state.* 2001, Vol. 43, Is. 12, P. 2234.
 15. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B.* 1993, Vol. 47, P. 558.
 16. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium. *Phys. Rev. B.* 1994, Vol. 49, P. 14251.
 17. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B.* 1996, Vol. 54, P. 11169.
 18. Hohenberg H., Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas. *Phys. Rev. A.* 1964, Vol. 136, P. B864.
 19. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev. A.* 1965, Vol. 140, P. A1133.
 20. Blochl P. E. Projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.* 1994, Vol. 50, P. 17953.
 21. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.* 1999, Vol. 59, P. 1758.
 22. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalised gradient approximation made simple. *Phys. Rev. Lett.* 1996, Vol. 77, P. 3865.
 23. Henkelman G., Jónsson H. Improved tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle points. *J. Chem. Phys.* 2000, Vol. 113, P. 9978.
 24. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B.* 1976, Vol. 13, P. 5188.
 25. Enta Y., Suzuki S., Kono S. Angle-resolved photoemission studies of clean and adsorbed Si(001) surfaces: 2×1 , $c(4 \times 2)$, 2×1 -Na and 2×2 -Ga. *Surf. Sci.* 1991, Vol. 242, P. 277.
 26. Tabata T., Aruga T., Murata Y. Order-disorder transition on Si(001): $c(4 \times 2)$ to (2×1) . *Surf. Sci.* 1987, Vol. 179, P. L63.
 27. Kuzubov A. A., Eliseeva N. S., Popov Z. I., Fedorov A. S., Serzhantova M. V., Denisov V. M., Tomilin F. N. Theoretical Study of Sorption and Diffusion of Lithium Atoms on the Surface of Crystalline Silicon and inside It. *JETP Letters.* 2013, Vol. 97, No. 11, P. 634.

© Кузубов А. А., Михалева Н. С., Попов З. И., Краснов П. О., Николаева К. М., 2015

PROPERTIES OF QUASICRYSTALLINE Al-Cu-Fe COATINGS PREPARED BY PLASMA SPRAYINGA. A. Lepeshev^{2,3}, I. V. Karpov^{1,2}, A. V. Ushakov^{1,2}, P. V. Zelenkov¹, L. Yu. Fedorov^{2*}¹ Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation² Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation³ Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: sfu-unesco@mail.ru

The physical, mechanical, and tribological properties of quasicrystalline coatings based on the $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$ alloy prepared by plasma spraying have been investigated. The specific features of the phase formation due to the competitive interactions of the icosahedral ψ and cubic β phases have been elucidated. Correlation between the microhardness and the content of the icosahedral phase in the coating has been determined. The decisive role of the quasicrystalline phase in the formation of high tribological characteristics of the coatings has been revealed and tested.

Keywords: quasicrystalline alloys, tribological tests, icosahedral phases, microhardness, plasma spraying.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 3. С. 750–757**СВОЙСТВА КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ Al-Cu-Fe-ПОКРЫТИЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ**А. А. Лепешев^{2,3}, И. В. Карпов^{1,2}, А. В. Ушаков^{1,2}, П. В. Зеленков¹, Л. Ю. Федоров^{2*}¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31² Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79³ Красноярский научный центр СОРАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

*E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Исследованы физико-механические и трибологические свойства квазикристаллических покрытий на основе сплава $Al_{65}Cu_{23}Fe_{12}$, полученных плазменным напылением. Установлены закономерности процесса фазообразования при конкурирующем взаимодействии икосаэдрической ψ и кубической β фаз. Определена корреляция между величиной микротвердости и содержанием в покрытии икосаэдрической фазы. Проведены испытания и выявлена приоритетная роль квазикристаллической фазы в формировании высоких трибологических характеристик покрытий.

Ключевые слова: квазикристаллические сплавы, трибологические испытания, икосаэдрическая фаза, микротвердость, плазменное распыление.

Introduction. Quasicrystalline alloys, which are characterized by an unusual quasiperiodic structure and a crystallographically forbidden fivefold symmetry axis, possess a unique set of chemical, physical, and mechanical properties [1–6]. In this respect, noteworthy are quasicrystalline Al–Cu–Me alloys (where Me is Fe, Cr, Mn, or V) with a relatively small specific weight, which have high values of the chemical durability, elastic

modulus, hardness, and wear resistance and a low value of the friction coefficient. The development of compositions and technologies for processing of these alloys has opened up wide possibilities for their use as antifriction materials in friction units. The high efficiency of friction pairs can be achieved both through the use of composites with a quasicrystalline alloy hardener and through the direct deposition of quasicrystalline coatings.

Among the most promising methods for fabricating units from quasicrystalline alloys is powder metallurgy, in particular, plasma spraying [7–14]. The use of technological capabilities of this method makes it possible, during the spraying of quasicrystalline coatings, not only to control their structure and phase composition but also to purposefully form composites with a specified ratio of the base material and quasicrystalline alloy components.

The purpose of this study is to investigate the processes of the structure and phase formation in quasicrystalline coatings under different technological conditions of their deposition and to perform tribological tests of the prepared coatings.

Experimental. The investigations were performed on samples of coatings deposited on the outer surface of the copper rings using an oscillating plasma torch with coaxial powder injection into the cathode region [8; 9]. The temperature conditions of deposition were controlled by a thermocouple connecting the inner part of the ring and the outer surface. The ligature and initial powders of the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ alloy for plasma spraying were prepared using the gas atomization method. The dispersion of the obtained powders was 25–106 μm .

The main parameters of the plasma spraying of quasicrystalline coatings based on the Al–Cu–Fe alloy are presented in tab. 1. Different thermal conditions of plasma spraying of the coatings were provided by varying the temperature of the copper substrate T_k .

The thickness of the deposited coatings varied in the range from 1.65 to 2.75 mm.

The X-ray structural and powder diffraction analyses of the initial powders and deposited quasicrystalline coatings were performed on a DRON-3 automated diffractometer (CuK_α radiation). The X-ray diffraction patterns were processed using the DRON-3 and ORIGIN-4 software programs.

The microstructure and morphological features of the quasicrystalline powders and coatings were examined on an MBI-15 optical microscope and a JEM-100C transmission electron microscope equipped with an EM-ASID-4 scanning adapter and an image processing system with the IMAGE-C software package.

The microhardness of the deposited quasicrystalline coatings was determined on a PMT-3 microhardness tester using the method of recovered indentation of a four-sided diamond pyramid.

The tribological tests were carried out on the upgraded SMT-1 friction machine according to the finger–disk scheme under conditions of dry friction.

Results and discussion. The X-ray structural investigations of the initial powder and deposited coatings revealed that the coatings have a heterophase structure (ψ , β , λ , θ phases) with the competitive formation of the main phases, namely, the icosahedral ψ phase and the cubic β phase.

Table 1

Parameters of the plasma spraying of quasicrystalline coatings

Parameter	Value
Arc current, A	200–250
Power, kW	13–17
Plasma-forming gas flow rate, kg/s	0.008–0.0127
Carrier gas flow rate, kg/s	0.08–0.12
Gas flow rate at the cross section, kg/s	0.0065
Spraying distance, mm	110–130
Powder flow rate, kg/s	0.046–0.056

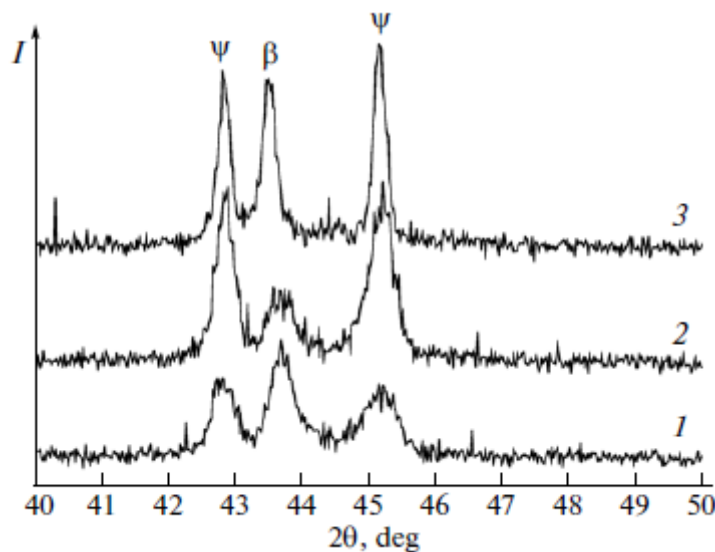


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ quasicrystalline alloy coatings deposited at different temperatures of the substrate $T_k = 500$ (1), 650 (2), and 850 (3) $^{\circ}\text{C}$

Fig. 1 shows the X-ray diffraction patterns (filtered CuK_α radiation) of the quasicrystalline coatings deposited at different temperatures of the substrate. It can be seen from this figure that intense diffraction peaks lie in the range of angles $2\theta = 42^\circ\text{--}46^\circ$ and that the structure of the coatings is heterogeneous and consists of a mixture of two main phases: the icosahedral ψ phase and the cubic β phase. The influence of the substrate temperature T_k on the phase formation and structure of the deposited quasicrystalline coatings manifests itself as a change in the intensity ratio of the diffraction peaks corresponding to the ψ and β phases, for example, (422222), (110), and (420024).

The weight content of the icosahedral phase in the deposited coatings was determined from the X-ray powder diffraction analysis data and the results obtained in [9; 15]. The calculated dependence of the weight content of the icosahedral phase in the coatings on the deposition conditions is shown in fig. 2. It can be seen that, with an increase in the substrate temperature, beginning from $T_k \sim 400^\circ\text{C}$, the fraction of the icosahedral phase increases, reaches a maximum near $T_k \sim 700^\circ\text{C}$, and then decreases to 33 % at $T_k \sim 880^\circ\text{C}$.

Thus, the highest content of the icosahedral phase in the coatings (80 %) is achieved upon their deposition on the substrates at a temperature of $600\text{--}750^\circ\text{C}$.

The temperature conditions of the formation of quasicrystalline coatings are primarily responsible for their morphology. Fig. 3 shows the cross sections of the coatings produced from the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ alloy at different substrate temperatures $T_k = 500, 650$, and 850°C . It can be seen from this figure that the morphological pattern (microcracks and pores, their concentration, size, and distribution) depends substantially on the conditions of the

formation of the coatings. In particular, at the substrate temperature $T_k = 500^\circ\text{C}$ (fig. 3, *a*), the coating is characterized by a large number of microcracks and cracks starting predominantly from the outer surface and, in some cases, extending through the entire thickness of the deposited layer. The pore formation nonuniformly occurs throughout the thickness of the coating, and the porosity reaches 20 % near the substrate bottom and 10 % on the free surface. In this case, an increase in the thickness of the coating leads to a decrease in the average pore size. In general, the pores have a rounded shape; however, near the inner surface of the deposited coating, there are pores that have an irregular shape and coalesce into microcracks [8; 10].

As the substrate temperature increases to $T_k = 650^\circ\text{C}$, the morphological pattern of the cross section changes (fig. 3, *b*). The pores acquire a spherical shape, the average pore size decreases, and the pore volume distribution becomes more uniform. Moreover, as in the case of the substrate temperature $T_k = 500^\circ\text{C}$, the coating also contains microcracks, even though to a lesser extent. Apparently, this is associated both with the specific features of the plasma spray technology and with the mechanical properties of the quasicrystalline alloy under investigation. Since the initial alloy has a high brittleness [4; 5], large internal stresses that are characteristic of rapid quenching lead not to plastic deformation but to the appearance of microcracks and to brittle fracture of deposited particles, which is clearly seen in fig. 3 at the substrate temperatures $T_k = 500$ and 650°C . The mechanism of the formation of long cracks arising on the side of the free surface of the deposited alloy coating is associated with the large shrinkage stresses generated during the rapid quenching under specified deposition conditions.

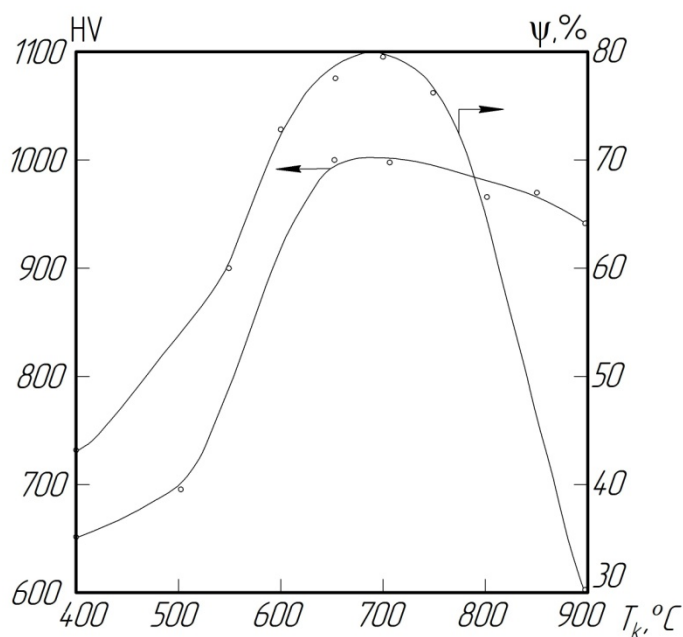


Fig. 2. Dependences of the microhardness HV and the weight content of the icosahedral ψ phase in the coatings on the substrate temperature T_k during the plasma spraying

At the substrate temperature $T_k = 850^\circ\text{C}$, the surface of the coating undergoes melting. This process leads to the fact that, in the bulk of the deposited coating, typical pores either are absent at all or have very small sizes, less than $1\text{ }\mu\text{m}$. However, as can be seen from fig. 3, *c*, the alloy region near the free surface contains large pores of the bubble type with a size of $80\text{ }\mu\text{m}$. The appearance of this layer can be associated with the intensive process of gas release through the molten region of the coating.

In order to better reveal the microstructure of the coating, these samples were subjected to selective etching. The cross sections of the samples of the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ alloy coatings are shown in fig. 4. It can be seen that the structure of these coatings is anisotropic and consists of uniform corrugated layers without foreign inclusions formed from molten particles, which is characteristic of the plasma spraying technology. The majority of the molten particles have a disklike shape and are formed upon the deformation and solidification of the

initial powder particles on the substrate, which were completely melted in the plasma. In addition, the coatings contain large particles, which were exposed to a high-temperature plasma jet but solidified before the collision with the substrate. The appearance of rounded small particles in the coating is caused by the spraying of larger droplets of the melt on the substrate. Furthermore, the deposited coatings contain particles of the mixed type, which combine features of several types of particles.

The interparticle layers formed during the deposition contain pores with the percentage of 6–10 % depending on the conditions used for the preparation of the coatings. In particular, the coatings deposited at the substrate temperature $T_k = 500^\circ\text{C}$ are characterized by the lowest density. As the substrate temperature increases from $T_k = 500^\circ\text{C}$ (fig. 4, *a*) to $T_k = 850^\circ\text{C}$ (fig. 4, *c*), the corrugated structure of the coatings becomes denser, and the content of pores in the bulk of the material significantly decreases.

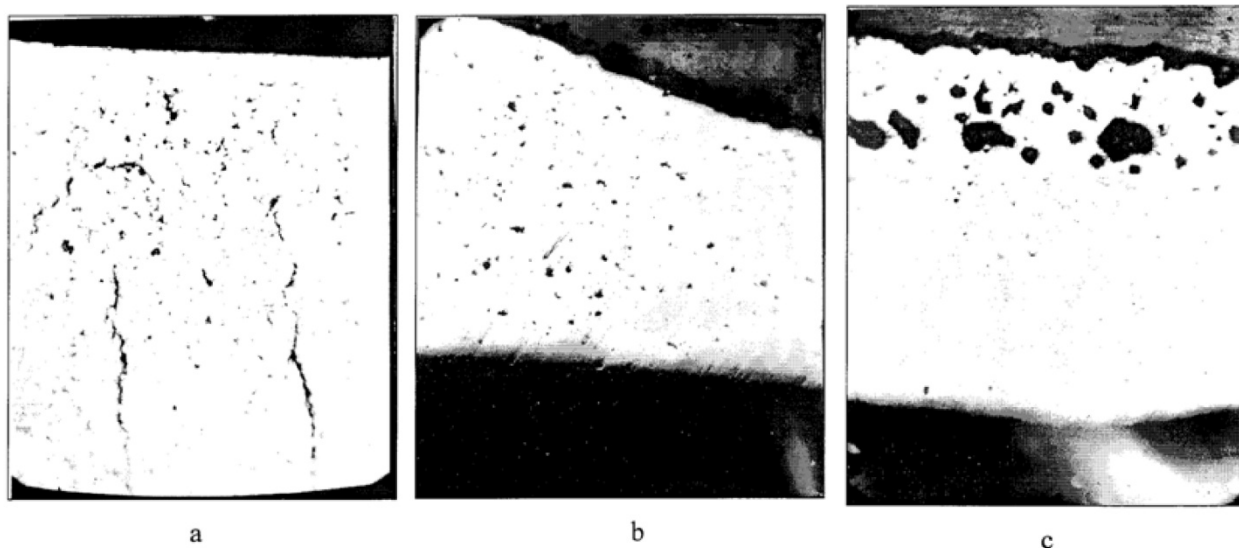


Fig. 3. Morphology of the cross section of the coatings (magnification, $\times 90$) deposited at different substrate temperatures:
a – $T_k = 500^\circ\text{C}$; *b* – $T_k = 650^\circ\text{C}$; *c* – $T_k = 850^\circ\text{C}$

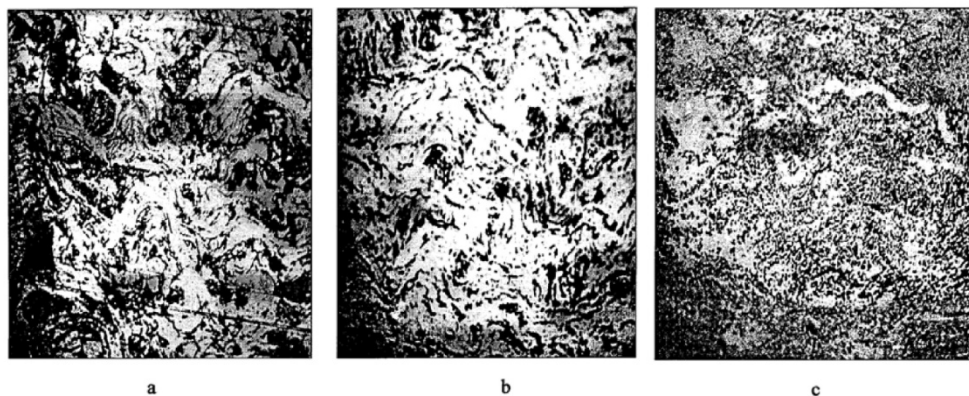


Fig. 4. Microstructure of the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ alloy coatings (magnification, $\times 630$) deposited at different substrate temperatures:
a – $T_k = 500^\circ\text{C}$; *b* – $T_k = 650^\circ\text{C}$; *c* – $T_k = 850^\circ\text{C}$

The microdiffraction pattern of the fracture surface of the deposited quasicrystalline coating consists of bright flat stepped regions. This pattern is characteristic of brittle fracture of the material. The cracking and fracture of the coating, as a rule, occur at the grain boundaries. A more detailed examination of the fracture surface revealed precipitates of individual powder particles and conglomerates forming the coating.

A comparative analysis of the microhardness was performed both on the initial quasicrystalline particles and on the deposited coatings based on them. The microhardness was determined on the polished surfaces of the samples with a roughness $Ra = 0.34$ by the diamond pyramid with an indentation load of 50 g for individual particles and an indentation load of 100 g for the deposited coating. According to the results of the measurements, the initial quasicrystalline particles have a microhardness of the order of 850–900 HV. Such high values of the microhardness are determined by the non-porous monolithic structure and the sufficiently high content of the icosahedral phase (~68 %) in the bulk of the initial powders.



Fig. 5. Measurements of the microhardness on the cross section of the coating deposited at the substrate temperature $T_k = 650$ °C (magnification, $\times 630$)

The microhardness of the coatings was examined on the samples prepared under different deposition conditions and with different contents of the icosahedral phase. Fig. 2 shows the combined dependences of the microhardness and the content of the icosahedral phase in the coatings on the temperature conditions of their deposition. It can be seen that the microhardness of the material increases both with an increase in the substrate temperature and with an increase in the weight content of the icosahedral phase. In particular, the microhardness of the coatings with a 80-percent content of the icosahedral phase reaches values of the order of 1000 HV. With a further increase in the substrate temperature $T_k > 700$ °C, although the content of the icosahedral phase in the coatings decreases, their microhardness remains rather high. Apparently, this is associated with the formation of the molten layer and with the decrease in the porosity of the coatings.

Noteworthy is a significant increase in the brittleness of the Al–Cu–Fe alloy, which is evidenced by the tests on determination of the microhardness. After the indentation of a Vickers pyramid into the coating, radially directed cracks arise around the expression, which propagate mainly from the corners of the quadrangle.

The homogeneity of the properties of the deposited coatings was determined by analyzing the microhardness distribution in the cross sections of the samples. These measurements were performed on polished cross sections of the coatings with a step of 0.2 mm, beginning from the inner surface. The results of these investigations are presented in fig. 5.

It can be seen that the structure of the indentations is identical almost over the entire thickness of the coating, which indicates a high uniformity of the deposited layers. The observed individual local overshoots of the values, most likely, can be explained by the fact that, during the measurements, the indenter falls into the interparticle space or into the region of pores of the deposited coating. The calculated values of the microhardness according to these indentations are presented in fig. 6.

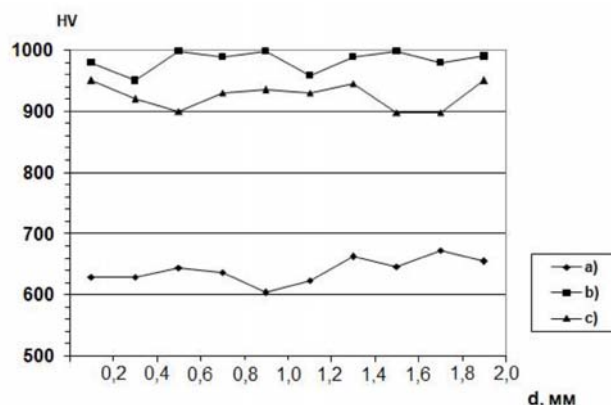


Fig. 6. Change of the microhardness HV in the cross section of the sample, beginning from the inner surface of the coatings deposited at different substrate temperatures $T_k = 500$ (a), 650 (b), and 850 (c) °C

The tribological (friction and wear) tests were carried out on the quasicrystalline coatings with the best combination of physical and mechanical properties, such as the content of the icosahedral phase, hardness, porosity, adhesion, etc.

The friction coefficient was determined using profilography with a Vickers pyramid under a load of 30 N for the Al–Cu–Fe alloy coatings deposited at different substrate temperatures T_k . The performed investigations demonstrated that the friction coefficients of the deposited coatings differ only slightly from each other and their values lie in the range $\mu = 0.15$ – 0.20 (tab. 2).

The somewhat larger friction coefficients, which are characteristic of quasicrystalline coatings deposited at $T_k = 400$ – 500 °C, can be explained by their higher porosity, lower content of the icosahedral phase, and microhardness.

The tests for wear resistance of the deposited coatings were carried out under dry friction conditions at different

loads, wear rates, and wear times. The hardened steel ShKh15 was used as a counterbody.

It was found that the studied coatings possess a high wear resistance: the weight loss of the alloy was small and changed only slightly depending on the applied load, wear rate, and testing time (fig. 7).

The morphological pattern of the coating surfaces after abrasion was smooth and did not exhibit grooves, adhesive wear traces, microcracks, and noticeable plastic deformation at the edges of the abrasion zone.

This behavior of the quasicrystalline coatings in testing for friction and wear differs significantly from the wear picture of the reference alloy VT 1-0 (fig. 7, curve 2). The results of the tests performed for the VT 1-0 alloy under conditions similar to those used in the experiments with the Al–Cu–Fe coatings have demonstrated that, even in the early stages, an increase in the specific pressure leads to a sharp increase in the wear rate. The morphology of the worn surface of the titanium alloy is typical of severe plastic deformation with scratches, deep grooves, and traces of gripping and metal transfer. This eventually determined the low wear resistance of the titanium alloy VT 1-0 as compared to the quasicrystalline coatings.

The observed high level of wear resistance of the quasicrystalline coatings under dry friction conditions is associated with both the low value of the friction coefficient and the high hardness of the deposited alloy coating. Since the friction coefficients of the studied

samples differ only slightly, the dominant role in the formation of high wear resistance, apparently, should belong to their high hardness.

Conclusion. Thus, from the practical point of view, the quasicrystalline coatings based on the Al–Cu–Fe alloy have important tribological characteristics under dry friction conditions. The technological principles underlying the preparation of such coatings are based on the justified choice of the chemical composition of the initial powders and the conditions of their deposition taking into account the regularities of the processes occurring in quasicrystalline alloys.

The morphological pattern of quasicrystalline coatings has a typical layered microstructure with a characteristic volume distribution of the pores and microcracks, which depends on the deposition conditions, in particular, on the substrate temperature T_k . The melting of the surface layer ($T_k = 850^\circ\text{C}$) leads to a decrease in the porosity in the bulk of the coating and to an increase in the gas release through the molten layer.

The formation of the quasicrystalline coating is accompanied by the competitive interaction of two main phases, namely, the icosahedral ψ phase and the cubic β phase. As the temperature of the substrate increases, the fraction of the icosahedral phase first increases, reaches 80 % at $T_k = 700^\circ\text{C}$, and then decreases to 33 % at $T_k = 880^\circ\text{C}$.

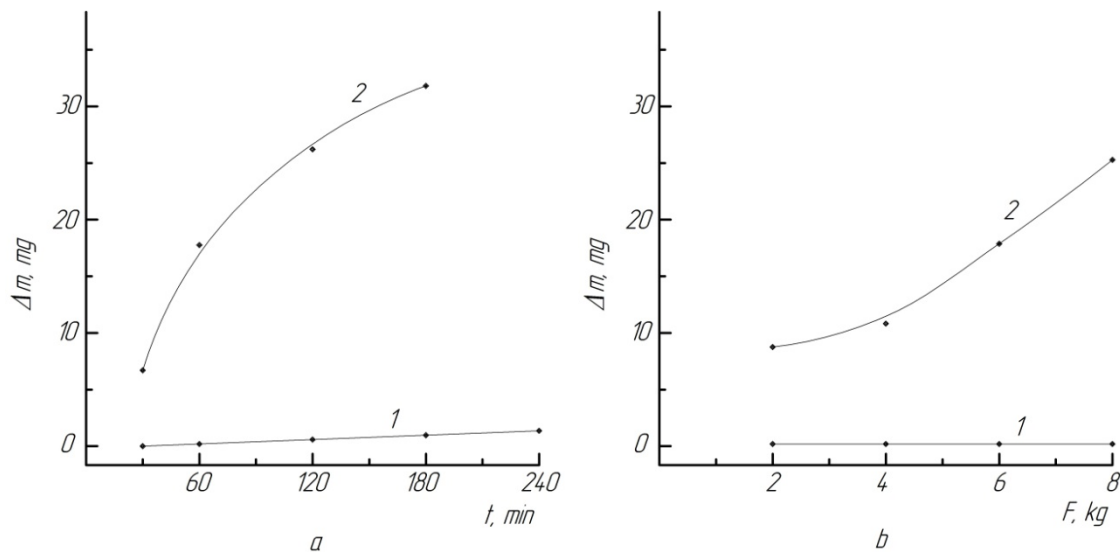


Fig. 7. Dependences of the weight loss of the $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{23}\text{Fe}_{12}$ coating (1) and the titanium alloy VT 1-0 (2): a – on the test time; b – the applied load

Table 2

Friction coefficients of the quasicrystalline coatings prepared under different technological conditions of deposition

$T_k, ^\circ\text{C}$	Friction coefficient μ
400	0.17–0.20
500	0.18–0.20
650	0.15–0.17
750	0.15–0.18
850	0.16–0.19

It has been found that there is a correlation between the microhardness and the content of the icosahedral phase in the coating. The microhardness of the coatings increases with an increase in the content of the γ phase and reaches $HV = 900\text{--}1000$ when the content of the γ phase is 80 % ($T_k = 700^\circ\text{C}$).

Благодарности. Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 11.370.2014/K, 11.1287.2014/K).

Acknowledgments. This work was supported in part by the Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation (projects no. 11.370.2014/K, 11.1287.2014/K).

References

1. Sordelet D. J., Rozhkova E. A., Besser M. F., Kramer M. J. Formation of quasicrystals in Zr-Pd-(Cu) melt spun ribbons and mechanically milled powders. *Intermetallics*, 2002, Vol. 10, No. 11–12, P. 1233–1240. Doi: 10.1016/S0966-9795(02)00138-3.
2. Sordelet D. J., Rozhkova E. A., Besser M. F., Kramer M. J. Synthesis route-dependent formation of quasicrystals in $\text{Zr}_{70}\text{Pd}_{30}$ and $\text{Zr}_{70}\text{Pd}_{20}\text{Cu}_{10}$ amorphous alloys. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, Vol. 80, No. 25, P. 4735. Doi: 10.1063/1.1488686.
3. Yang X. Y., Kramer M. J., Rozhkova E. A., Sordelet D. J. Coincident lattice sites between cubic β -Zr(Pt) and an isochemical icosahedral phase in rapidly solidified $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ alloys. *Scr. Mater.*, 2003, Vol. 49, No. 9, P. 885–890. Doi: 10.1016/S1359-6462(03)00440-8.
4. Koster U., Liu W., Leibertz H., Michel M. Mechanical properties of quasicrystalline and crystalline phases in Al-Cu-Fe alloys. *J. Non-Cryst. Solids*, 1993, No. 153–154, P. 446–452. Doi: 10.1016/0022-3093(93)90393-C.
5. Noskova N. I., Yartsev S. V. [Quasicrystals and quasicrystalline phases]. *Fiz. Met. Metalloved.* 1994, Vol. 78, No. 6, P. 34–48 (In Russ.).
6. Kronmuller H., Moser N. Phase transitions between quasicrystalline and amorphous structures. *Z. Phys. Chem. Neue Folge*, 1988, No. 157, P. 837.
7. Sordelet D. J., Kramer M. J., Unal O. Effect of starting powders on the control of microstructural development of Al-Cu-Fe quasi-crystalline plasma-sprayed coatings. *J. Therm. Spray Technol.*, 1995, Vol. 4, No. 3, P. 235–244. Doi: 10.1007/BF02646966.
8. Lepesheva E. A. *Formirovanie fazovogo sostava, struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv kvazikristallicheskikh pokrytiy. Dis. cand. tehn. nauk.* [Formation of the phase composition, structure and physico-mechanical properties of quasicrystalline coatings Al-Cu-Fe during plasma spraying. *Cand. techn. sci. diss.*]. Krasnoyarsk, 1999, 120 p. (In Russ.).
9. Lepeshev A. A., Sordelet D. J., Rozhkova E. A., Ushakov A. V. Modification of Structure and Physico-Mechanical Properties of Al-Cu-Fe Quasicrystal Alloy at Plasma Spraying. *J. Cluster Sci.*, 2011, Vol. 22, No. 2, P. 289–294. Doi: 10.1007/s10876-011-0378-2.
10. Lepeshev A. A., Kashkina L. V., Rubleva T. N., Nogin A. A., Sadnin V. N. [The study of morphological features of plasma coatings quasicrystalline Al-Cu-Fe].

Teoriya i eksperiment v sovremennoy fizike. Krasnoyarsk State University, Krasnoyarsk, 2000, P. 144 (In Russ.).

11. Saunin V. N., Telegin S. V. [Plasma Spraying Ferrite Coverage]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 1(53), P. 168–174 (In Russ.).

12. Miheev A. E., Harlamov V. A., Krjuchek S. D., Chernjatina A. A., Homenko I. I. [Study of the Composition and Residual Plasma-forming Gases in the Chamber Vacuum Coaters]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 2(48), P. 216–219 (In Russ.).

13. Karpov I. V., Ushakov A. V., Fedorov L. Yu., Lepeshev A. A. Method for Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low Pressure Pulsed Arc Discharge. *Tech. Phys.*, 2014, Vol. 84, No. 4, P. 559–563. Doi: 10.1134/S1063784214040148.

14. Lepeshev A. A., Bayukov O. A., Rozhkova E. A., Karpov I. V., Ushakov A. V., Fedorov L. Yu. Modification of the Phase State and Structure of the Al-Cu-Fe Quasi-Crystalline Alloy during Plasma Deposition. *Phys of the Solid State*, 2015, Vol. 57, No. 2, P. 255–259. Doi: 10.1134/S1063783415020249.

15. Ebalard S., Spaepen F. The body-centered-cubic-type icosahedral reciprocal lattice of the Al-Cu-Fe quasi-periodic crystal. *J. Mater. Res.*, 1989, No. 4, P. 39–43. Doi: 10.1557/JMR.1989.0039.

Библиографические ссылки

1. Formation of quasicrystals in Zr-Pd-(Cu) melt spun ribbons and mechanically milled powders / D. J. Sordelet [et al.] // *Intermetallics*. 2002. Vol. 10, no. 11–12. P. 1233–1240. Doi: 10.1016/S0966-9795(02)00138-3.
2. Synthesis route-dependent formation of quasicrystals in $\text{Zr}_{70}\text{Pd}_{30}$ and $\text{Zr}_{70}\text{Pd}_{20}\text{Cu}_{10}$ amorphous alloys / D. J. Sordelet [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80, no. 25. P. 4735. Doi: 10.1063/1.1488686.
3. Coincident lattice sites between cubic β -Zr(Pt) and an isochemical icosahedral phase in rapidly solidified $\text{Zr}_{80}\text{Pt}_{20}$ alloys / X. Y. Yang [et al.] // *Scr. Mater.* 2003. Vol. 49, no. 9, p. 885–890. Doi: 10.1016/S1359-6462(03)00440-8.
4. Mechanical properties of quasicrystalline and crystalline phases in Al-Cu-Fe alloys / U. Koster [et al.] // *J. Non-Cryst. Solids*. 1993. No. 153–154. P. 446–452. Doi: 10.1016/0022-3093(93)90393-C.
5. Носкова Н. И., Пономарева Е. Г. Квазикристаллы и квазикристаллические фазы // ФММ. 1994. № 6 (78). С. 34–48.
6. Kronmuller H., Moser N. Phase transitions between quasicrystalline and amorphous structures // *Z. Phys. Chem. Neue Folge*. 1988. No. 157. P. 837.
7. Sordelet D. J., Kramer M. J., Unal O. Effect of starting powders on the control of microstructural development of Al-Cu-Fe quasi-crystalline plasma-sprayed coatings // *J. Therm. Spray Technol.* 1995. Vol. 4, no. 3. P. 235–244. Doi: 10.1007/BF02646966.
8. Лепешева Е. А. Формирование фазового состава, структуры и физико-механических свойств квазикристаллических покрытий : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 1999. 120 с.

9. Modification of Structure and Physico-Mechanical Properties of Al–Cu–Fe Quasicrystal Alloy at Plasma Spraying / A. A. Lepeshev [et al.] // *J. Cluster Sci.* 2011. Vol. 22, no. 2. P. 289–294. Doi: 10.1007/s10876-011-0378-2.
10. Исследование морфологических особенностей квазикристаллических плазменных покрытий Al–Cu–Fe / А. А. Лепешев [и др.] // Теория и эксперимент в современной физике. Красноярск : Изд-во КГУ, 2000. С. 144–151.
11. Саунин В. Н., Телегин С. В. Плазмонапыленные ферритовые покрытия // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 168–174.
12. Исследование состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 216–219.
13. Method for Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low Pressure Pulsed Arc Discharge / I. V. Karpov [et al.] // *Tech. Phys.* 2014. Vol. 84, no. 4. P. 559–563. Doi: 10.1134/S1063784214040148.
14. Modification of the Phase State and Structure of the Al–Cu–Fe Quasi-Crystalline Alloy during Plasma Deposition / A. A. Lepeshev [et al.] // *Phys of the Solid State.* 2015. Vol. 57, no. 2. P. 255–259. Doi: 10.1134/S1063783415020249.
15. Ebalard S., Spaepen F. The body-centered-cubic-type icosahedral reciprocal lattice of the Al–Cu–Fe quasi-periodic crystal // *J. Mater. Res.* 1989. No. 4. P. 39–43. Doi: 10.1557/JMR.1989.0039.

© Lepeshev A. A., Karpov I. V., Ushakov A. V., Zekenkov P. V., Fedorov L. Yu., 2015

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЧАСТИЦ
БЕТА-РАСПАДА В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ**

С. В. Телегин*, В. Н. Саунин, Е. Я. Чесноков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: telegin@sibsau.ru

Для увеличения точности в расчетах при выборе материалов экрана разработана методика экспериментального определения длины свободного пробега частиц β -распада в порошковых материалах. Погрешность расчета материалов сложного химического состава по эмпирическим формулам достигает 30 %. Для исследования выбрали порошок ПТ НА 01. Выбор обусловили тем, что он имеет в составе два элемента, и длину свободного пробега можно рассчитать по формулам с высокой точностью. Данные морфологического исследования порошка выявили его основной фракционный состав – 87 % от 40 до 80 мкм и осколочную форму частиц. Процентное содержание лака в образце определяли экспериментально. Лучшей оказалась композиция с 3 % лака в сухом остатке. Установлено, что при полимеризации лак теряет 50 % массы. Исследование технологических факторов изготовления образцов показало, что оптимальное давление прессования составляет 6 т/см², при этом плотность образцов не превышает 65 %. Значение давления выбрали в зависимости от прочностных свойств брикетов. Источником β -излучения при исследованиях являлось излучение изотопа Sr–Y с интенсивностью $2,7E+05$ имп/с. Оценку вклада связующего проводили на образцах из чистого лака. Измерения показали, что его коэффициент ослабления составляет $1,26 \pm 3$ % для толщины образца 0,08 см с плотностью $1,07\text{--}1,18$ г/см³. При рассматриваемых измерениях вкладом связующего можно пренебречь, так как его содержание не превышает 3 % от массы наполнителя. В результате исследования зависимости интенсивности от толщины получили значение экстраполированного пробега электронов в материале образцов $(0,21 \pm 0,04)$ см, что принадлежит области доверительного интервала значения рассчитанного по эмпирическим формулам пробега 0,14 см с учетом коэффициента заполнения, равного 0,65, с точностью до 15 %. С целью увеличения коэффициента заполнения и уменьшения толщины лака на частицах рассмотрели влияние вязкости лака на величину плотности. Расстояния между частицами у образцов с лаком, который развели 1:1 по массе с этиловым спиртом, заметно меньше. Коэффициент заполнения у этих образцов достиг 0,88, а длина экстраполированного пробега $(0,16 \pm 0,02)$ см. Точность определения длины свободного пробега по предложенной методике не превышает 10 % в данном материале.

Ключевые слова: ионизирующие излучения, β -распад, длина свободного пробега, плотность, порошковый материал.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 758–762**DETERMINATION OF PARTICLE MEAN FREE PATH BETA DECAY
IN THE PARTICULATE MATERIAL**

S. V. Telegin*, V. N. Saunin, E. Ya. Chesnokov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochoy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: telegin@sibsau.ru

We developed a method for the experimental determination of the mean free path of the particles of β -decay in powder materials, to improve the accuracy of calculations when selecting materials for screens. Error in the calculation materials of complex chemical composition by empirical formulas reaches 30 %. For the study, we took a powder PT-NA-01. Selection is based on the fact that the powder is composed of two elements, the mean free path of the electrons can be calculated according to the formulas with high accuracy. Morphological study of the powder showed that the particles are in the shape of fragments and 87 % of their size in the range of 40 to 80 microns. The weight ratio of lacquer in a powder sample was determined experimentally. The best was the composition comprising 3 % lacquer in the dry residue. It has been found that the polymerization of lacquer loses 50 % of the mass. Investigation of factors of manufacturing process of samples showed that the optimal compression pressure of 6 t / cm², and the density of the

samples do not exceed 65 %. The pressure is chosen depending on the strength properties of the briquettes. We used radiation isotope ^{90}Sr with intensity $2,7 \times 10^5$ pulses / sec. The proportion of radiation absorption in the binder was investigated on samples of lacquer. The measurements showed that its attenuation coefficient is $1,26 \pm 3$ % for the thickness of 0.08 cm with a density of $1,07\text{--}1,18 \text{ g/cm}^3$. In these studies, the contribution of the binder can be neglected because its content does not exceed 3 % by weight of filler. It was found that dependence of intensity on the thickness of the sample, the value of the extrapolated path of the electrons is equal to $(0,21 \pm 0,04)$ cm, it belongs to the region of the confidence interval, the values calculated by empirical formulas 0.14 cm divided by the fill factor was equal to 0.65, the calculation accuracy of 15 %. To increase the fill factor and reduce the thickness of the lacquer on the particles, we examined the effect of the viscosity of the lacquer on the density of the sample. The distance between the particles in the samples with lacquer, which dissolved 1:1 by weight with ethanol is much smaller. The fill factor of these samples reached 0.88, and extrapolated path – $(0,16 \pm 0,02)$ cm. The accuracy of calculation of the mean free path of the proposed method does not exceed 10 % in this material.

Keywords: ionizing radiation, β -decay, mean free path, density, powder material.

Введение. Основным материалом при изготовлении защитных экранов (ЗЭ) от ионизирующих излучений (ИИ) приборов и прецизионных устройств в космической технике является алюминий [1]. Его основные достоинства – это малый вес, высокая пластичность, хорошие экранирующие свойства, невысокая цена и др. [2]. На практике, элементы или целиком блоки, чувствительные к ИИ, заключают в оболочку из алюминия толщиной от 0,1 до 1 см. Эффективность этих экранов начинает резко снижаться при толщинах свыше 1 см, так как при взаимодействии заряженных частиц с ядрами материала экрана возникает интенсивное электромагнитное тормозное излучение, обладающее высокой проникающей способностью [3]. Увеличение массы ЗЭ приводит к увеличению стоимости вывода спутников на орбиту на 25–50 % [4; 5]. Но, с другой стороны, увеличение срока активного существования спутника требует применения экранов для уменьшения накопленной дозы в элементах устройств.

Данная проблема характеризуется двойственным подходом. Материал защитного экрана должен быть по защитным свойствам более эффективным, чем алюминиевый, при одинаковой плотности или при одинаковом экранировании обладать меньшей плотностью. Решение такой задачи находится в области конструкции экрана, потому что взаимодействие ИИ с веществом довольно хорошо изучено и для однородных материалов не представляет особой трудности [6; 7]. Но получить требуемые свойства возможно только с применением гетерогенных структур, расчетные формулы для которых имеют большую погрешность (до 40 %), и область их применения ограничена как выбором элементного состава, так и спектральными характеристиками излучения [8; 9].

Одним из основных параметров материала при проектировании конструкций защитных экранов от β -излучения является длина свободного пробега (ДСП) электронов [10; 11]. Погрешность расчета ДСП по эмпирическим формулам может достигать 30 % в зависимости от сложности химического состава исследуемого материала [12].

Для увеличения точности в расчетах при выборе материалов экрана была разработана методика, так как обычным прессованием не удавалось получить образцы требуемой толщины и прочности.

За основу была взята методика, используемая в ГОСТ 13610–79 при подготовке образцов сердечников стержневой формы для проведения магнитных испытаний [13]. В ней порошковый материал обрабатывается лаком с последующей сушкой, просеиванием, брикетированием под давлением и полимеризацией лака в печи.

Методика эксперимента и оборудование. Отработка технологии изготовления образцов проводилась на порошке ПТ НА 01, содержащем 95 % никеля и остальное – алюминий. Выбор порошка обусловлен возможностью точного расчета его ДСП по формулам для последующего сравнения с измеренным.

Морфологические исследования проводились на микроскопе фирмы JANEVERT. Определение фракционного состава проводилось с помощью набора сит. Взвешивание материалов проводилось на весах ВЛА-200М с точностью до 0,01 г.

В качестве связующего выбран лак МЛ92, широко используемый в промышленности и допущенный к применению в космических аппаратах. Процентное содержание лака в образце определялось экспериментально. Изготовлены три серии образцов с содержанием лака 2, 3 и 4 % в пересчете на сухой остаток лака, который при полимеризации теряет 50 % массы.

Брикетирование проводилось на прессе ИП-1000, оборудованном измерительными системами скорости нагружения и предельного давления.

Зависимость плотности упаковки от величины нагрузки при прессовании брикетов исследовалась при значениях давления 4, 6, 8 т/см² (392, 588, 784 Мн/м²). Плотность образцов определялась методом гидростатического взвешивания [14].

Для сушки образцов применялся вакуумный сушильный шкаф ВШ-0,035А, температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой (тип К).

Измерения ослабляющей способности материалов к ионизирующим излучениям проводилось на разработанной и изготовленной установке экспресс-контроля. В качестве датчика импульсов использовался счетчик Гейгера–Мюллера СБТ-9. Счетчик СБТ-9 имеет тонкое слюдяное «окно», которое делает его чувствительным не только к γ - и жесткому β -излучению (оно воспринимается через тонкостенный металлический корпус-катод), но и к мягкому β - и даже α -излучению. Установка оборудована счетчиком импульсов СТ6-2Р и пересчетным прибором

ПС-20, имеющими разную чувствительность при большой скважности, что необходимо при исследовании тонких образцов. В качестве источника бета-излучения использовалось излучение изотопа SrY.

Результаты и обсуждение. Морфологические исследования показали, что частицы порошка ПТ НА 01 имеют неправильную осколочную форму, слипания частиц в конгломераты не наблюдается (рис. 1).

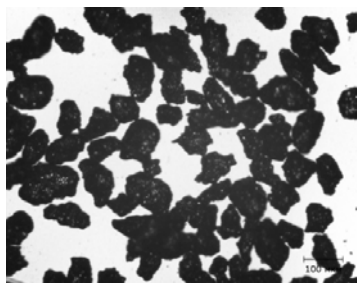


Рис. 1. Форма частиц порошка $\times 64$

Просеивание порошка через сита с разными ячейками определило, что он в основном состоит из частиц с размером от 40 до 80 мкм (табл. 1).

Таблица 1

Фракционный состав порошка

Содержание, %	Величина фракции, мкм
8,8	> 80
87,1	< 80; > 40
4,1	< 40

Образцы с содержанием лака 2 % после спекания не имели достаточной прочности, при легком надавливании разрушались. Также отбракованы и образцы с 4 % лака; частицы после сушки слипались, их не-

возможно было разделить в ступке и просеять. Лучшей оказалась комбинация с 3%-ным содержанием лака.

Тонкие образцы, изготовленные при прессовании 4 т/см², отбраковывались из-за низких прочностных характеристик, и в дальнейшем все образцы, прессованные при данных условиях, не исследовались.

Плотность образцов при прессовании с давлением 6 т/см² составляет $\approx 65\%$, что определялось гидростатическим взвешиванием, по плотности на рис. 2 и получено по расчету через объем и массу. Образцы, изготовленные при большем давлении, имели такую же плотность, это можно объяснить малым содержанием фракции (меньше 40 мкм) в составе порошка (табл. 1).

Чтобы оценить вклад связующего, были изготовлены образцы из лака. Измерения показали, что коэффициент ослабления не превышает $1,26 \pm 3\%$ для толщины образца 0,08 см с плотностью 1,07–1,18 г/см³.

Результаты исследований серии образцов представлены в табл. 2. Погрешности измерений интенсивности, геометрические и весовые погрешности не превышают 6, 1 и 1 % соответственно. Интенсивность источника – $2,7E+05$ имп/с. При данных измерениях вкладом связующего можно пренебречь, так как его содержание не превышает 3 %.

В результате исследования зависимости интенсивности от толщины было получено значение экстраполированного пробега электронов [15] в материале образцов ($0,21 \pm 0,04$) см, что принадлежит области доверительного интервала значения рассчитанного [16] пробега 0,14 см с учетом коэффициента заполнения, равного 0,65, с точностью до 15 %.

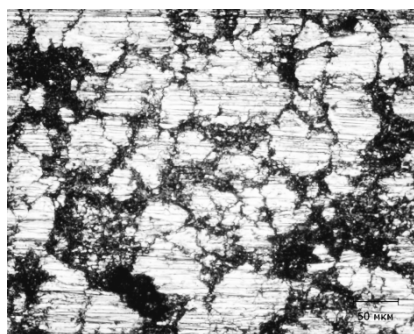
С целью увеличения коэффициента заполнения и уменьшения толщины лака на частицах рассмотрено влияние вязкости лака на плотность. Расстояния между частицами у образцов с лаком, разведенным 1:1 по массе с этиловым спиртом, заметно меньше (рис. 2).

Таблица 2

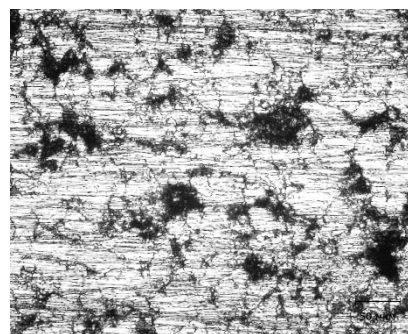
Результаты измерений

№ образца	1	2	3	4	5	6	5*	7	8	7*	9	10
Толщина, см	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,14	0,15	0,16	0,18	0,17	0,22	0,24
Вес, г	0,51	0,67	0,90	1,04	1,31	1,54	1,66	1,94	2,04	2,17	2,60	2,88
Интенсивность, имп/с	$1,6E+05$	$1,2E+05$	$6,5E+04$	$3,5E+04$	$1,4E+04$	$2,6E+03$	$1,2E+03$	$9,1E+02$	$6,5E+02$	$6,0E+02$	$3,5E+02$	$3,6E+02$
Коэффициент ослабления	1,74	2,40	4,41	8,21	20,7	112	230	314	442	477	825	896

* Серия при нагрузке прессования 8 т/см².



а



б

Рис. 2. Фото шлифов образцов с различной вязкостью лака $\times 128$:
а – в состоянии поставки; б – разведённый 1:1

Коэффициент заполнения у этих образцов достиг 0,88, а длина экстраполированного свободного пробега ($0,16 \pm 0,02$) см. Точность определения ДСП не превышает 10 % в данном материале.

Проведенные исследования показали, что предложенную методику возможно использовать для изучения порошковых материалов, входящих в состав композиционных защитных конструкций.

Заключение.

1. Определены необходимые условия для изготовления образцов. Количество связующего не должно превышать 3 % по массе в пересчете на сухой остаток лака. Оптимальное давление прессования для фракционного состава 40–80 мкм составляет 6 т/см².

2. Увеличение коэффициента заполнения возможно за счет уменьшения вязкости лака МЛ92 путём его смешивания с этиловым спиртом в соотношении 1:1, что подтверждается фотографиями шлифов (рис. 2) и определением плотности.

3. Измерения показали, что вкладом связующего для данных измерений можно пренебречь, так как его коэффициент ослабления не превышает $1,26 \pm 3$ % для толщины образца 0,08 см с плотностью 1,07–1,18 г/см³, и его общая доля по массе не превышает 3 %.

4. Предложенную методику возможно использовать для экспериментального определения длины свободного пробега электронов в порошковых материалах с погрешностью, не превышающей 10 %.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, № Б-169/14.

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation № Б-169/14.

Библиографические ссылки

- Кузнецов Н. В. Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/crd3.htm>. (дата обращения: 12.04.2015).
- Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения / Е. А. Джур [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 6 (52). С. 126–131.
- Радиационные условия на геостационарной орбите / И. П. Безродных [и др.] // Вопросы электромеханики : труды НПП ВНИИЭМ. 2010. Т. 117, № 4. С. 33–42.
- Дюпон Д. Ядерные взрывы на орбите // В мире науки (Scientific American). 2004. № 9. С. 62–70. ISSN0208-0621.
- Лобановский Ю. И. Цена космоса: сколько стоит выход на орбиту? [Электронный ресурс]. URL: <http://www.synerjetics.ru/article/cost.pdf>. (дата обращения: 12.04.2015).
- Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М. : Атомиздат, 1974. 229 с.

7. Tabata T., Ito R., Okabe S. Generalized semiempirical equations for extrapolated range of electrons // Nucl. Instr. Meth. 1972. Vol. 103. P. 85–91.

8. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты / Н. Г. Гусев [и др.] ; под ред. Н. Г. Гусева. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат. 1989. 512 с.

9. Tobato T., Ito R. An algorithm for the energy deposition by fast electrons // Nucl. Sci. and Eng. 1974. Vol. 53. P. 226–243.

10. Katz L., Penfold A. S. Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption // Rev. Mod. Phys. 24. 1952. P. 28–44.

11. Holbert K. E. CHARGED PARTICLE IONIZATION AND RANGE. EEE460-Handout [Электронный ресурс]. URL: <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/IonizationRange.pdf> (дата обращения: 12.04.2015).

12. Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом : учеб. пособие. 4-е изд. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. 369 с.

13. ГОСТ 13610–79. Железо карбонильное радиотехническое. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1984. 17 с.

14. ГОСТ 25281–82. Метод определения плотности формовок. Введ. 1983.01.01. М. : Изд-во стандартов, 1982. 9 с.

15. Беспалов В. И. Лекции по радиационной защите : учеб. пособие. 4-е изд., расшир. Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. 508 с.

16. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений : справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Электроатомиздат, 1995. 496 с.

References

- Kuznetsov N. V. *Radiatsionnaya opasnost' na okolozemnykh orbitakh i mezoplanetnykh traektoriyakh kosmicheskikh apparatov* [Radiation hazard in earth orbit and interplanetary spacecraft trajectories] (In Russ.) Available at: <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/IonizationRange.pdf> (accessed 10.1.2013).
- Dzhur E. A., Sanin A. F., Bozhko S. A. i dr. [Composite material for protection of electronic equipment spacecraft from ionizing radiation]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 6 (52), P. 126–131 (In Russ.).
- Bezrodnykh I. P., Morozova E. I., Petrukovich A. A. et al. [The radiation environment in geostationary orbit]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy NPP VNIIEМ*. 2010, Vol. 117, No 4, P. 33–42 (In Russ.).
- Dyupon D. Nuclear explosions in orbit. *Scientific American*. 2004. Vol. 290, Is. 6, P. 100.
- Lobanovskiy Yu. I. *Tsena kosmosa: skol'ko stoit vykhod na orbitu?* [Price of cosmos: how much does it cost to orbit?] Available at: <http://www.synerjetics.ru/article/cost.pdf>. (accessed 10.1.2013).
- Baranov V. F. *Dozimetriya elektronnoy izlucheniya* [The electron radiation dosimetry]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 229 p.

7. Tabata T., Ito R., Okabe S. Generalized semiempirical equations for extrapolated range of electrons. *Nucl. Instr. Meth.* 1972, Vol. 103, P. 85–91.
8. Gusev N. G., Klimanov V. A., Mashkovich V. P., Surov A. P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy*. [Protection against ionizing radiation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, Vol. 1, 512 p.
9. Tobato T., Ito R. An algorithm for the energy deposition by fast electrons. *Nucl.Sci.and Eng.* 1974, Vol. 53, P. 226–243.
10. Katz L., Penfold A. S. Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption. *Rev. Mod. Phys.* 1952, Vol. 24, P. 28–44.
11. EEE460-Handout. Available at: <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/IonizationRange.pdf> (accessed 12.04.2015).
12. Bespalov V. I. *Vzaimodeistvie ioniziruyushchikh izluchenii s veshchestvom* [The interaction of ionizing radiation with matter]. Tomsk, TPU Publ., 2008, 369 p.
13. *GOST R 13610–79. Zhelezo karbonil'noe radio-tekhnicheskoe. Tekhnicheskie usloviya.* [State Standard R 13610–79. Iron carbonyl radio. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1984, 17 p.
14. *GOST R 25281–82. Metod opredeleniya plotnosti formovok.* [State Standard R 25281–82. Method of determining the density of molds] Moscow, Standartinform Publ., 1982, 9 p.
15. Bespalov V. I. *Leksii po radiatsionnoi zashchite* [Lectures on radiation protection]. Tomsk, TPU Publ., 2012, 508 p.
16. Mashkovich V. P., Kudryavtseva A. V. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izluchenii* [Protection against ionizing radiation] Moscow, Elektroatomizdat Publ, 1995, 496 p.

© Телегин С. В., Саунин В. Н.,
Чесноков Е. Я., 2015

INFLUENCE OF PLASMA SYNTHESIS OF ZrO_2 NANOPARTICLES
ON MAGNETIC FLUX PINNING IN GRANULAR $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ A. V. Ushakov^{1,2}, I. V. Karpov^{1,2}, A. A. Lepeshev^{2,3}, L. Yu. Fedorov^{2*}, A. A. Shaihadinov²¹ Reshetnev Siberian State Aerospace University

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

² Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³ Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

* E-mail: sfu-unesco@mail.ru

In this work, the effect of ZrO_2 nanoparticles prepared in a low-pressure arc discharge plasma on magnetic flux pinning of granular $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nanoZrO_2$ composites has been studied. It has been shown that the ZrO_2 nanoparticles do not change the superconducting transition and the microstructure of superconductors. At a temperature of 5 K, the addition of 0.5 and 1 wt % of ZrO_2 nanoparticles may lead to the additional effect of magnetic flux pinning and the increase in the critical current density J_c . The J_c value for composites with 1 wt % is two times larger than that for the reference sample. The fishtail effect is observed for $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nanoZrO_2$ composites at the temperatures of 20 and 50 K. The problems associated with the additional effect of magnetic flux pinning of granular $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nanoZrO_2$ composites and the appearance of the fishtail effect have been discussed.

Keywords: nanoparticles, low-pressure arc discharge plasma, superconductors, magnetic flux pinning, fishtail effect.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 3. С. 763–769ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ZrO_2 ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
НА ПИННИНГ МАГНИТНОГО ПОТОКА В ГРАНУЛЯРНЫХ $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ А. В. Ушаков^{1,2}, И. В. Карпов^{1,2}, А. А. Лепешев^{2,3}, Л. Ю. Федоров^{2*}, А. А. Шайхадинов²¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31² Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³ Красноярский научный центр СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

* E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Изучено влияние наночастиц ZrO_2 , полученных в плазме дугового разряда низкого давления, на пиннинг магнитного потока гранулярных $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nano-ZrO_2$ композитов. Показано, что наночастицы ZrO_2 не меняют сверхпроводящего перехода и микроструктуры сверхпроводников. При температуре 5 K добавление 0,5 и 1 % по массе наночастиц ZrO_2 может привести к дополнительному эффекту пиннинга магнитного потока и увеличению плотности критического тока J_c . Для композитов с 1 масс. % J_c в два раза больше, чем у эталонного образца. При температуре 20 и 50 K наблюдается fishtail-эффект для композитов $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nano-ZrO_2$. Обсуждаются вопросы, связанные с дополнительным эффектом пиннинга магнитного потока гранулярных $YBa_2Cu_3O_{7-y}/nano-ZrO_2$ композитов и возникновение fishtail-эффекта.

Ключевые слова: наночастицы, плазма дугового разряда низкого давления, сверхпроводники, пиннинг магнитного потока, fishtail-эффект.

Introduction. High critical current densities J_c are of considerable significance for multiple prospective applications of high-temperature superconductors such as wires for electric energy transmission and magnets [1–3].

As a rule, the limitation of J_c is connected with two main factors [4]. First, J_c is limited by the thermally activated magnetic flux creep; i. e., it decreases considerably under the action of a magnetic field much less than the critical

field $H_c(T)$. This phenomenon is caused by the well-known properties of high-temperature superconductors, e. g., the high anisotropy and small coherence length, which lead to weak magnetic flux pinning. Second, J_c in polycrystalline high-temperature superconductors is limited by the insufficient ordering of crystallites and their chemical inhomogeneity, which leads to weak coupling with low critical current densities. This problem is overcome by different methods of growing the texture such as oxide-powder-in-tube, OPIT [5]. Owing to this technology, the value $J_c > 80 \text{ kA/cm}^2$ was reached in short multiwire Bi-2223/Ag strips at a temperature of 77 K [6].

In the last years, there appeared many new methods of creating pinning centers and, accordingly, increasing the critical current J_c of high-temperature superconductors. Of the highest interest among them are the following. Amorphous cylindrical tracks with a diameter of about 10 nm and length from 1 to 10 were prepared by heavy-ion bombardment of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ single crystals [7]. Tracks in amorphous $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ were prepared by proton irradiation with the subsequent decay of Bi nuclei [8]. The magnetization hysteresis and critical temperature of $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_6$ were increased by its neutron irradiation [9].

However, the application of these technologies is accompanied by considerable difficulties: serious hindrances in the application of accelerators, radioactive elements, and neutron irradiation.

Obviously, it is necessary to study further the methods of the incorporation of defects or impurities into the superconducting matrix. Apparently, the most realistic approach is the preliminary mixing of nanoparticles and high-temperature superconducting powder and then the performance of the standard technological procedures, i. e., annealing, sintering, and oxygenation (if necessary). The following advantages will be achieved: the possibility of industrial application, the considerable decrease in the anisotropy of magnetic properties, and the considerable increase in the critical current when the contact between the grains is enhanced.

The nanoparticles should meet the following main requirements: first, their size should be comparable with the coherence length of the high-temperature superconductors and, second, they should be stable in a chemically aggressive medium at elevated temperatures. This is necessary for the optimization of superconductivity in the matrix material. In this work, we chose ZrO_2 nanoparticles for studies in the form of inclusions in a polycrystalline superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ matrix. The melting temperature of ZrO_2 reaches 2400 °C. They are chemically stable. The aim of this work is to study the effect of ZrO_2 nanoparticles prepared in a low-pressure arc discharge plasma on the magnetic flux pinning of the granular $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ composites.

Experimental. The powder of the precursor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ was prepared using the conventional solid-phase synthesis. The $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ composite was synthesized according to the technique described in detail in [10–12]. The material was synthesized under the following conditions. Technically pure zirconium was used as the sputtering cathode. Prior to the evaporation, the cathode was heated to a working temperature of 800 K. The purification in the glow discharge was performed at

the voltage on the substrate of 1000 V for 1 min. The ion bombardment activation was performed for 1 min at an arc discharge current of 20 A and a voltage on the substrate of 1000 V. The rotation frequency of the mixing device was 8 min^{-1} . The vibration amplitude was 1 mm. The vibration frequency was 50 Hz. The direct deposition of the ZrO_2 nanoparticles on the high-temperature superconducting microgranules was performed at a discharge current of 500 A. The longitudinal magnetic field strength created by the focusing coil of the cathode surface was 6366.2 A/m. To implement the plasma-chemical reaction, a 5 % O_2 + 95 % He gas mixture was inserted in the chamber using a two-channel regulator of the gas flow rate after the preliminary evacuation to a pressure of 1 mPa. The synthesis was performed at a pressure above 120 Pa. After the deposition of the nanoparticles, the samples were passivated in a pure oxygen atmosphere for a day. The prepared samples of the material contained from 0.1 to 1 wt % of nanoparticles.

The prepared mixture was preliminarily heated to 940 °C and kept at this temperature for 30 h. The preliminarily heated powder was ground and then pressed into tablets with a diameter of 1 mm and a thickness of 5 mm at a pressure of $1.2 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$. Finally, the granules were sintered at 940 °C for 24 h and then cooled to room temperature in an oven in air.

Magnetization was recorded by differential Hall magnetometry with the use of two semiconductor Hall sensors switched opposite to the Hall potential outputs. The first Hall sensor was far from the sample and measured the external magnetic field H . The second sensor was placed on the sample surface and measured the magnetic flux density. As a result of the apparatus subtraction of the Hall potential of the first Hall sensor from the potential of the second Hall sensor, the resultant signal appeared corresponding to the magnetization $M(H)$. According to the Bean formula including the demagnetization factor and the dependence of the critical current on the magnetic field, $J_c(H) = 30M(H)/d$, where M is the width of the magnetic hysteresis loop and d is the average size of the crystallite. We used the value $d = 6$ obtained from the electron microscopy results. The hysteresis magnetic loops were measured at 5, 20, and 50 K. The pinning force was calculated using the equation $F_p(B) = J_c(B)B$ [13].

The phase composition of the high-temperature superconducting samples was studied on an XRG-6000 diffractometer using CuK_α radiation. The phase composition and the size of the coherent scattering regions were analyzed using the PCPDFWIN database.

The sample structure was studied by scanning electron microscopy on a JEM-100CX electron microscope with an ASID-4D scanning device at an accelerating voltage of 40 keV.

Results and discussion. Fig. 1 shows the X-ray diffraction patterns of all $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ composites. Peaks related to the admixture of the ZrO_2 phase or other oxides are absent. The characteristic peaks of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ do not shift. The study of the temperature dependence of the magnetic susceptibility showed that the

superconducting transition temperature T_c does not change and is 90 K for all samples. No large aggregates of the ZrO_2 nanoparticles were detected using scanning electron microscopy. Thus, the ZrO_2 nanoparticles are homogeneously distributed over the superconducting matrix. The field dependences $F_p(B)$ and J_c of the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ composite are shown in fig. 2–4.

Fig. 2 shows the magnetic field dependences of the calculated critical current density J_c and the pinning force F_p at a temperature of 5 K for all studied composites. It is seen in Fig. 2, *a* that, for all applied magnetic fields, J_c is much higher for composites with 0.5 and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles than that for the sample without the addition of ZrO_2 nanoparticles. For the composite with 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles, the J_c value is two times higher than that for the samples without nanoparticles. It is seen in fig. 2, *b* that the pinning force F_p for all composites increases with the applied magnetic field. In the whole range of the applied magnetic field, the pinning force F_p of composites with 0.5 and 0.1 wt % of ZrO_2 nanoparticles is higher than that of the pure sample $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$. These plots show that the addition of the

ZrO_2 nanoparticles leads to the formation of additional effective pinning centers. These centers can increase the pinning force of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductors and improve their critical current densities J_c at a temperature of 5 K.

Fig. 3 shows the magnetic field dependences of the calculated critical current density J_c and the pinning force F_p at the temperature of 20 K for all studied composites. It is seen that, for the samples with 0.5 and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles at a magnetic field below 1.5 T, J_c and F_p are less than the respective values for samples without the ZrO_2 nanoparticles. However, in the field range from 1.5 to 5 T, the J_c value of the samples with 0.5 and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles is comparable with that for the pure sample $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$. This fact indicates that the ZrO_2 nanoparticles enhance the weak intergranular bonds of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ in the specified magnetic field range. As the magnetic field increases above 2 T, the critical current density for the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ composites with 0, 0.5, and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles increases, i. e., the fishtail effect is observed.

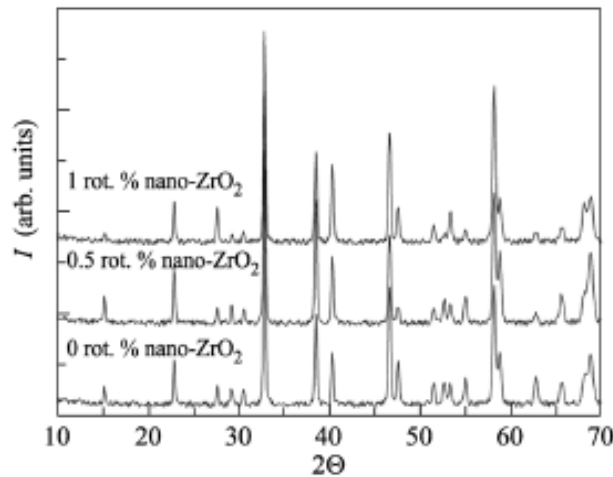


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{ZrO}_2$ composites with 0, 0.5, and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles

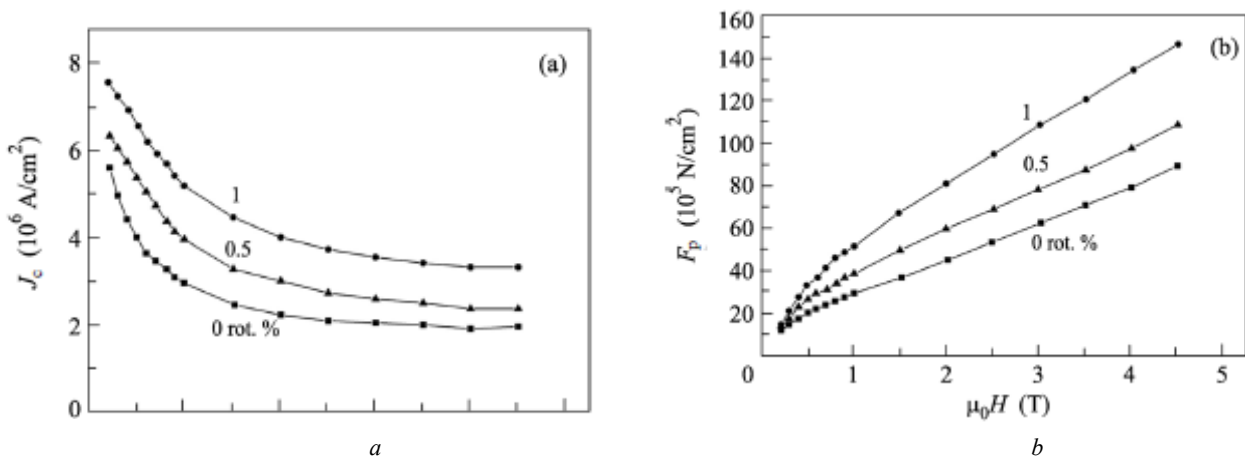


Fig. 2. Magnetic field dependences of J_c (*a*) and F_p (*b*) for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{ZrO}_2$ composites with 0, 0.5, and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles at 5 K

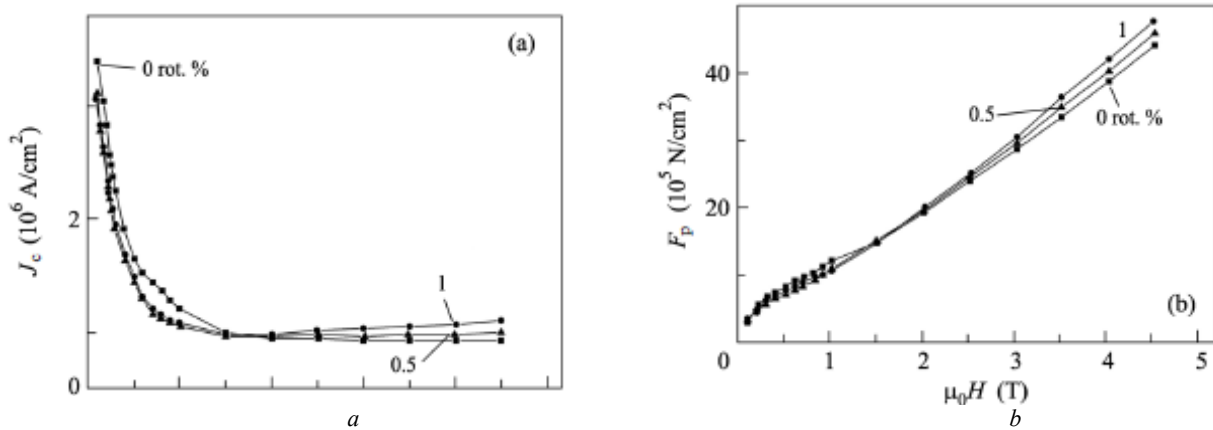


Fig. 3. Magnetic field dependences of J_c (a) and F_p (b) for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{ZrO}_2$ composites with 0, 0.5, and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles at 20 K

Fig. 4 shows the magnetic field dependences of the calculated critical current density J_c and the pinning force F_p at a temperature of 50 K for all studied composites. It can be seen that J_c and F_p for the samples with 0.5 and 1.0 wt % of ZrO_2 nanoparticles are less than those for the samples without ZrO_2 nanoparticles at a magnetic field below 0.8 T. This fact means that the additives of ZrO_2 nanoparticles in the specified magnetic field range favor the weakening of the intergranular bonds of the superconductor. However, for a magnetic field in the range from 0.8 to 3 T, J_c of composites is higher than that of the reference sample. For a field above 3 T, J_c of composites is less than that of the reference sample; i. e., the fishtail effect is also observed.

An analogous behavior is observed for the magnetic field dependence of the pinning force. The results obtained show that the addition of the nonsuperconducting ZrO_2 nanoparticles homogeneously dispersed in the matrix in the YBCO superconducting systems can affect magnetic flux pinning and creep. The role of the ZrO_2 nanoparticles in the increase in the critical current density is similar to the role of inclusions of the phase 211 [14]. It assumes that the decreased size of these particles directly conditions the increased pinning. At the same time, rather large particles of the normal (nonsuperconducting) phase 211 naturally decrease the superconducting properties of the sample. Therefore, to optimize the properties of the ceramic, it is necessary to control the concentration and size of the ZrO_2 nanoparticles in the precursor powder used for the preparation of YBCO [15].

No general understanding has been achieved yet concerning the mechanism of the effect of Y211 on pinning in high-temperature superconducting fused textured ceramic materials on the basis of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$. In [16], it was assumed that the Y211 particles may act as an effective flux of the pinning centers. In [17], there was an attempt to semi quantitatively theoretically interpret the behavior of $J_c(T, H)$ at high temperatures in high magnetic fields. The authors of [18] considered the defects associated with the interface of the Y211 particles and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ as effective pinning centers, which was confirmed quite successively by many experimental results. An alternative explanation of the increase in the current

density J_c may be the transition from the ordered state of the vortex lattice to the disordered state because of the interaction of the lattice with ZrO_2 nanoparticles. It is assumed [19] that the order-disorder transition is implemented if the transverse deformations of the vortex filaments u satisfy the Lindemann criterion: $u = c_L a_0$, where c_L is the Lindemann number, $a_0 = (\Phi_0/B)^{1/2}$ is the intervortex distance, and Φ_0 is the magnetic flux quantum. These deformations lead to the increase in the elastic energy of the order-disorder transition. Therefore, the order-disorder transition is implemented when the increase in the elastic energy $E_e l$ is compensated by the pinning energy E_p . The energy E_p does not depend on the angle at pinning on point defects.

Many studies show that the oxygen vacancies lead to the appearance of the fishtail effects in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ samples [16]. It was established that the oxygen saturation of samples under its controlled isostatic pressure and high temperatures (under the condition of the initial heating to high temperatures in a nitrogen medium) makes it possible to considerably decrease the crack formation in the YBCO ceramics, increase the mechanical characteristics of the material and accelerate the saturation process, and achieve the record high values of the critical current density.

The average size of the ZrO_2 nanoparticles is considerably larger than the coherence length of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductors. Therefore, the statement that the ZrO_2 nanoparticles act as effective pinning centers seems to be incorrect. In addition, the average size of the ZrO_2 nanoparticles is comparable with the penetration depth of the system of YBaCuO superconductors, so that the role of the interphase pinning in $\text{ZrO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ systems is limited. In our opinion, ZrO_2 nanoparticles in the $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconductor are responsible for the pinning expansion. They lead to the distortions of the crystal structure on the interface surface, affect the distribution of the oxygen-deficient regions, and increase the number of microregions with low J_c . In this respect, $\text{ZrO}_2/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ composites in comparison with pure samples manifest the enhancement of pinning in wide temperature and magnetic field ranges. As a result, they have a higher critical current density.

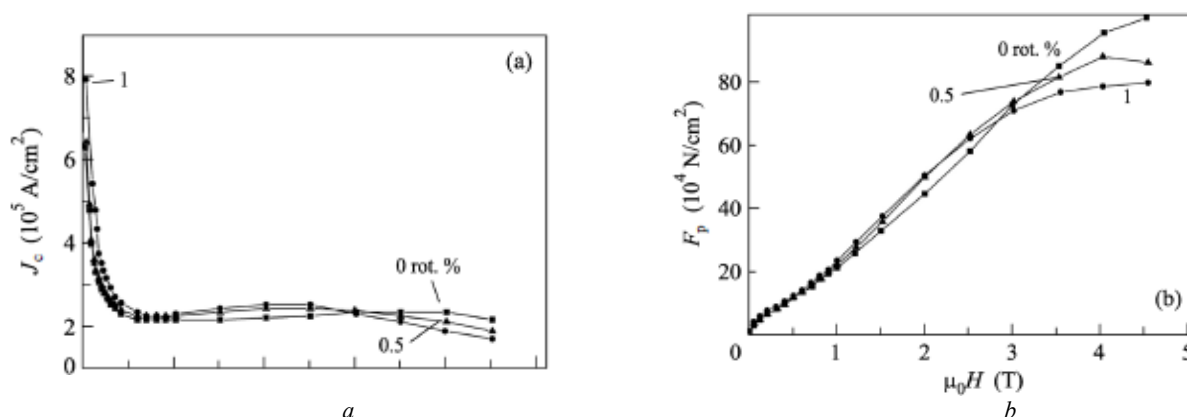


Fig. 4. Magnetic field dependences of J_c (a) and F_p (b) for YBa₂Cu₃O_{7-y}/ZrO₂ composites with 0, 0.5, and 1.0 wt % of ZrO₂ nanoparticles at 50 K

At a low temperature (in our case, $T = 5 \text{ K}$), the role of the localized microregions is minimal. For this reason, we did not observe the fishtail effects in ZrO₂/YBa₂Cu₃O_{7-y} composites with additives of 0, 0.5, and 1.0 % of ZrO₂ nanoparticles. At higher temperatures ($T = 20$ and 50 K), the role of the localized microregions is manifested, the additional pinning center flux appears, and the fishtail effect can be observed for all ZrO₂/YBa₂Cu₃O_{7-y} composites.

Conclusion. Thus, ZrO₂ nanoparticles homogeneously dispersed in the matrix of YBa₂Cu₃O_{7-y} superconductors can lead to the existence of additional effective magnetic flux pinning centers. As a result, the critical current density J_c in the ZrO₂/YBa₂Cu₃O_{7-y} composite with 1.0 % of ZrO₂ nanoparticles is improved twofold in comparison with that of the pure YBa₂Cu₃O_{7-y} superconductor. At temperatures of 20 and 50 K, the fishtail effect was observed in the magnetic field dependences of the current density and pinning force in all studied ZrO₂/YBa₂Cu₃O_{7-y} composites. ZrO₂ nanoparticles cause the distortions of the crystal structure on the interface surface and affect the distribution of the oxygen-deficient regions. In addition, they are responsible for an increase in the number of microregions with low density J_c .

Acknowledgments. This work was supported in part by the Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation (projects no. 11.370.2014/K, 11.1287.2014/K).

Благодарности. Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 11.370.2014/K, 11.1287.2014/K).

References

1. Foltyn S. R., Civale L., MacManus-Driscoll J. L., Jia Q. X., Maierov B., Wang H., Maley M. Materials science challenges for high-temperature superconducting wire. *Nature Mater.*, 2007, Vol. 6, No. 2, P. 631–642. Doi:10.1038/nmat1989.
2. Velikanov D. A. [CKVID Magnetometer to Investigate the Magnetic Properties of Materials in the Range]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 2 (48), P. 176–181 (In Russ.).

3. Lyashenko S. A., Varnakov S. N., Tarasov I. A., Shevcov D. V., Ovchinnikov S. G. [Magnetoellipsometric Automation in situ measurements on UHV Complex for Synthesis and Study of Spintronics Material]. *Vestnik SibGAU*, 2012, No. 4 (44), P. 162–168 (In Russ.).
4. Larbalestier D., Gurevich A., Feldmann D., Polyanский A. High-Tc superconducting materials for electric power applications. *Nature*, 2001, Vol. 414, No. 6861, P. 368–377. Doi:10.1038/35104654.
5. Vale L. R., Ono R. H., Rudman D. A. YBa/sub2/Cu/sub3/O/sub7-x/ Josephson junctions on bicrystal Al/sub2/O/sub3/ and SrTiO/sub3/ substrates. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1997, Vol. 7, No. 2, P. 3193–3196. Doi:10.1109/77.622009.
6. Chin C. C., Lin R. J., Yu Y. C., Wang C. W., Lin E. K., Tsai W. C., Tseng T. Y. Resonant Rutherford backscattering studies of cerium oxide thin films deposited by RF sputtering. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1997, Vol. 7, No. 2, P. 1403–1406. Doi:10.1109/77.620833.
7. Goyal A., Kang S., Leonard K. J., Martin P. M., Gapud A. A., Varela M., Paranthaman M., Ijaluola A. O., Specht E. D., Thompson J. R., Christen D. K., Pennycook S. J., List F. A. Irradiation-free, columnar defects comprised of self-assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in YBa₂Cu₃O₇ films. *Supercond. Sci. Tech.*, 2005, Vol. 18, No. 11, P. 1533–1538. Doi:10.1088/0953-2048/18/11/021.
8. Norton D. P., Goyal A., Budai J. D., Christen D. K., Kroeger D. M., Specht E. D., He Q., Saffian B., Paranthaman M., Klabunde C. E., Lee D. F., Sales B. C., List F. A. Epitaxial YBa₂Cu₃O₇ on Biaxially Textured Nickel (001): An Approach to Superconducting Tapes with High Critical Current Density. *Science*, 1996, No. 274, P. 755–757. Doi:10.1126/science.274.5288.755.
9. Goyal A., Norton D. P., Kroeger D. M., Christen D. K., Paranthaman M., Specht E. D., Budai J. D., He Q., Saffian B., List F. A., Lee D. F., Martin P. M., Klabunde C. E., Hatfield E., Mathis J., Park C. Conductors with controlled grain boundaries: An approach to the next generation, high temperature superconducting wire. *J. Mater. Res.*, 1997, Vol. 12, No. 11, P. 2924–2940. Doi:10.1557/JMR.1997.0387.

10. Karpov I. V., Ushakov A. V., Fedorov L. Yu., Lepeshev A. A. Method for Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low Pressure Pulsed Arc Discharge. *Tech. Phys.*, 2014, Vol. 84, No. 4, P. 559–563. Doi:10.1134/S1063784214040148.
11. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Petrov M. I. Study of Magnetic Flux Pinning in Granular $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ Composites. *JETP Letters*, 2014, Vol. 99, No. 2, P. 105–109. Doi:10.1134/S002136401402009X.
12. Fedorov L. Yu., Karpov I. V., Ushakov A. V., Lepeshev A. A. Influence of Pressure and Hydrocarbons on Carbide Formation in the Plasma Synthesis of TiC Nanoparticles. *Inorganic Materials*, 2015, Vol. 51, No. 1, P. 25–28. Doi:10.1134/S0020168515010057.
13. Mochida T., Chikumoto N., Murakami M. Flux pinning by $\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ inclusions in $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors: A combined effect of point, interface, and $\Delta\kappa$ pinning at elevated temperatures. *Phys. Rev. B*, 2000, Vol. 62, No. 2, P. 1350–1360. Doi:10.1103/PhysRevB.62.1350.
14. Sengupta S., Shi D., Wang Z., Biondo A. C., Balachandran U., Goretti K. C. Effect of Y_2BaCuO_x precipitates on flux pinning in melt-processed $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. *Phys. C*, 1992, Vol. 199, No. 1–2, P. 43–49. Doi:10.1016/0921-4534(92)90538-N.
15. Lo W., Cardwell D. A., Dung S. L., Barter R. G. Preparation and properties of spray dried precursor powder for melt-processed bulk YBCO ceramics. *J. Mater. Res.*, 1996, Vol. 11, No. 1, P. 39–49. Doi:10.1557/JMR.1996.0006.
16. Prikhna T. A., Gawalek W., Sandiumenge F., Moshchil V. E., Melnikov V. S., Dub S. N., Habisreuther T., Surzhenko A. B., Nagorny P. A. High pressure-high temperature effect on melt textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high temperature superconductive material. *J. Mater. Sci.*, 2000, Vol. 35, No. 7, P. 1607–1613. Doi:10.1023/A:1004735309435.
17. Salama K., Lee D. F. Progress in melt texturing of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconductor. *Supercond. Sci. Technol.*, 1994, Vol. 7, No. 4, P. 177–193. Doi:10.1088/0953-2048/7/4/002.
18. Lee D. F., Selvamanickan V., Salama K. Influences of Y_2BaCuO_5 particle size and content on the transport critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconductor. *Phys. C*, 1992, Vol. 202, No. 1–2, P. 83–96. Doi:10.1016/0921-4534(92)90299-R.
19. Ertas D., Neison D. R. Irreversibility, mechanical entanglement and thermal melting in superconducting vortex crystals with point impurities. *Phys. C*, 1996, Vol. 272, No. 1–2, P. 79–86.
3. Автоматизация магнитоэллипсометрических in situ измерений на сверхвысоковакуумном комплексе для синтеза и исследования материалов спинтроники / С. А. Лященко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 162–168.
4. High-Tc superconducting materials for electric power applications / D. Larbalestier [et al.] // *Nature*. 2001. Vol. 414, no. 6861. P. 368–377. Doi: 10.1038/35104654.
5. Vale L. R., Ono R. H., Rudman D. A. $\text{YBa}/\text{sub}2/\text{Cu}/\text{sub}3/\text{O}/\text{sub}7-x/$ Josephson junctions on bicrystal $\text{Al}/\text{sub}2/\text{O}/\text{sub}3/$ and $\text{SrTiO}/\text{sub}3/$ substrates // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. Vol. 7, no. 2. P. 3193–3196. Doi: 10.1109/77.622009.
6. Resonant Rutherford backscattering studies of cerium oxide thin films deposited by RF sputtering / C. C. Chin [et al.] // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. Vol. 7, no. 2. P. 1403–1406. Doi: 10.1109/77.620833.
7. Irradiation-free, columnar defects comprised of self-assembled nanodots and nanorods resulting in strongly enhanced flux-pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ films / A. Goyal [et al.] // *Supercond. Sci. Tech.* 2005. Vol. 18, no. 11. P. 1533–1538. Doi: 10.1088/0953-2048/18/11/021.
8. Epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ on Biaxially Textured Nickel (001): An Approach to Superconducting Tapes with High Critical Current Density / D. P. Norton [et al.] // *Science*. 1996. No. 274. P. 755–757. Doi: 10.1126/science.274.5288.755.
9. Conductors with controlled grain boundaries: An approach to the next generation, high temperature superconducting wire / A. Goyal [et al.] // *J. Mater. Res.* 1997. Vol. 12, no. 11, P. 2924–2940. Doi: 10.1557/JMR.1997.0387.
10. Method for Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low Pressure Pulsed Arc Discharge / I. V. Karpov [et al.] // *Tech. Phys.* 2014. Vol. 84, no. 4. P. 559–563. Doi: 10.1134/S1063784214040148.
11. Study of Magnetic Flux Pinning in Granular $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}/\text{nanoZrO}_2$ Composites / A. V. Ushakov [et al.] // *JETP Letters*. 2014. Vol. 99, no. 2. P. 105–109. Doi: 10.1134/S002136401402009X.
12. Influence of Pressure and Hydrocarbons on Carbide Formation in the Plasma Synthesis of TiC Nanoparticles / L. Yu. Fedorov [et al.] // *Inorganic Materials*. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 25–28. Doi: 10.1134/S0020168515010057.
13. Mochida T., Chikumoto N., Murakami M. Flux pinning by $\text{Nd}_4\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{10}$ inclusions in $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors: A combined effect of point, interface, and $\Delta\kappa$ pinning at elevated temperatures // *Phys. Rev. B*. 2000. Vol. 62, no. 2. P. 1350–1360. Doi: 10.1103/PhysRevB.62.1350.
14. Effect of Y_2BaCuO_x precipitates on flux pinning in melt-processed $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ / S. Sengupta // *Phys. C*. 1992. Vol. 199, no. 1–2. P. 43–49. Doi: 10.1016/0921-4534(92)90538-N.
15. Preparation and properties of spray dried precursor powder for melt-processed bulk YBCO ceramics / W. Lo [et al.] // *J. Mater. Res.* 1996. Vol. 11, no. 1. P. 39–49. Doi: 10.1557/JMR.1996.0006.

Библиографические ссылки

1. Materials science challenges for high-temperature superconducting wire / S. R. Foltyn [et al.] // *Nature Mater.* 2007, Vol. 6, No. 2. P. 631–642. Doi: 10.1038/nmat1989.
2. Великанов Д. А. СКВИД-магнитометр для исследования магнитных свойств материалов в интервале температур 4,2–370 К // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 176–181.

16. High pressure-high temperature effect on melt textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ high temperature superconductive material / T. A. Prikhna // *J. Mater. Sci.* 2000. Vol. 35, no. 7. P. 1607–1613. Doi: 10.1023/A:1004735309435.

17. Salama K., Lee D. F. Progress in melt texturing of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconductor // *Supercond. Sci. Technol.* 1994. Vol. 7, no. 4. P. 177–193. Doi: 10.1088/0953-2048/7/4/002.

18. Lee D. F., Selvamanickan V., Salama K. Influences of Y_2BaCuO_5 particle size and content on the transport critical current density of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ superconductor // *Phys. C*. 1992. Vol. 202, no. 1–2. P. 83–96. Doi: 10.1016/0921-4534(92)90299-R.

19. Ertas D., Neison D. R. Irreversibility, mechanical entanglement and thermal melting in superconducting vortex crystals with point impurities // *Phys. C*. 1996. Vol. 272, no. 1–2. P. 79–86.

© Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A.,
Fedorov L. Yu., Shaihadinov A. A., 2015

**МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОТОЧЕК С ОДНООСНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

В. А. Фельк*, П. Е. Ерошенко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: vlaf@nm.ru

Произведено численное моделирование основного состояния ферромагнитных наноточек с одноосной анизотропией. Расчет основного состояния проводился с использованием пакета трехмерного микромагнитного моделирования OOMMF для двух типов геометрии образца – кубической и эллипсоидальной с простыми кубическими решетками. Рассматривались случаи ферромагнетика типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость». При моделировании были использованы материальные параметры пермаллоя и материалов типа SmCo. Последние допускают значения одноосной анизотропии, на несколько порядков превышающие технологически реализуемые значения у пермаллоя. Показано, что для эллипсоидальной наноточки с материальными параметрами пермаллоя существует переходная область по размеру образца, в которой основное состояние является сильно вырожденным. Установлено, что при превышении верхней границы переходной области имеется тенденция к стабилизации вихревого основного состояния. При любом размере образца пермаллоя эффектов зависимости топологии основного состояния системы от величины и знака константы одноосной магнитной анизотропии не выявлено. Для кубической геометрии образца пермаллоя существование стабильного вихря в основном состоянии оказывается возможным при размерах наноточки, в несколько раз превышающих эллипсоидальный случай. Для образцов с материальными параметрами SmCo большая одноосная анизотропия оказывает стабилизирующий эффект на вихревые структуры в основном состоянии наноточки. Вихревое состояние оказывается реализуемым для значительно меньших размеров наноточки по сравнению с пермаллоем. При определенном размере наноточки SmCo основное состояние (в легкоосном случае) приобретает скирмионоподобный характер.

Ключевые слова: наноточки, ферромагнитные вихри, основное состояние ферромагнетика.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 770–775**MICROMAGNETIC SIMULATIONS OF THE MAIN STATE
OF FERROMAGNETIC NANODOTS WITH UNIAXIAL ANISOTROPY**

V. A. Fel'k*, P. E. Eroshenko

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: vlaf@nm.ru

The work performed numerical simulations of the ground state of the ferromagnetic nanodots with uniaxial anisotropy. The calculation of the ground state was performed using a three-dimensional micromagnetic simulation package OOMMF for two types of sample geometry – cubic and ellipsoidal with a simple cubic lattice. Cases were analyzed as a ferromagnet of the “easy axis” and “easy plane”. In the simulation permalloy material parameters and materials such as SmCo were used. The latter allowed values of the uniaxial anisotropy which is several orders higher than technologically realizable values from permalloy. It is shown that for an ellipsoidal nanodots with permalloy material parameters, there is a transition region, the size of the sample in which the ground state is highly degenerated. It is found that above the upper boundary of the transition region there is a tendency to vortex stabilization of the ground state. For any sample size permalloy effects depending on the topology of the ground state of the system on the magnitude and sign of the constant uniaxial magnetic anisotropy have been identified. For a cubic specimen geometry permalloy existence of a stable vortex in the ground state is possible if the size of nanodots is several times higher than that of the ellipsoidal case. For samples with material parameters SmCo large uniaxial anisotropy has a stabilizing effect on the vortex structure in the ground state nanodots. Vortex state is feasible for much smaller nanodots, in comparison with the permalloy. Under specific size of nanodots SmCo ground state (in the case of easy-axis) acquires skyrmion-like character.

Keywords: nanodots, ferromagnetic vortices, ferromagnetic ground state.

Введение. Нарастающий в последние годы интерес к наноматериалам с магнитным упорядочением обусловлен значительными перспективами их практических приложений [1]. Современные вычислительные возможности позволяют ставить численные эксперименты, учитывающие дискретность микромагнитной структуры исследуемой модели. Результаты подобных численных экспериментов представляют значительную ценность в ситуациях, не позволяющих в принципе получить аналитический результат. В связи с этим в последние годы появилось большое число работ по исследованию свойств наноматериалов, основываясь на их микромагнитных моделях [2–8]. Наряду с этим проводятся исследования по оптимизации численных алгоритмов и их адаптации к конкретным микромагнитным проблемам [9; 10].

В наиболее общем случае основное состояние магнитоупорядоченной системы получается в результате численного интегрирования дифференциального уравнения Ландау–Лифшица с диссипативным членом, начиная со случайно заданной начальной конфигурации магнитных моментов. Этот подход реализован в пакетах по микромагнитному моделированию OOMMF [11] и Magpar [12] и допускает исследование как статических, так и динамических микромагнитных проблем. Несмотря на общность подхода, он обладает тем недостатком, что для получения конечного распределения магнитных моментов происходит вычисление всей эволюции магнитной системы во времени. Данное обстоятельство существенно влияет на скорость сходимости алгоритма к равновесной конфигурации. Альтернативный подход для вычисления равновесной конфигурации магнитных моментов в конденсированной среде из ее дискретной модели, минуя вычисление промежуточных стадий эволюции магнитной системы, был предложен в работе [13].

Интерес к магнитным вихрям возник в 70-х гг. XX столетия, когда стало понятно, что в двумерных легкоплоскостных магнетиках вихри (или связанные вихревые пары) играют роль нелинейных (солитонных) элементарных возбуждений, а разрыв вихревых пар приводит к фазовому переходу Березинского–Костерлица–Таулесса [14]. В то же время вихри как топологически нетривиальные распределения намагниченности представляют интерес для фундаментальной физики магнетизма. Для малых магнитных частиц вихревое распределение намагниченности минимизирует энергию размагничивающего поля, т. е. вихри являются альтернативой обычной доменной структуры и реализуют основное состояние малых магнитных частиц различной формы [15; 16]. Интерес к магнитным вихрям значительно вырос в последние годы, когда они были обнаружены для случая субмикронных частиц магнитомягких материалов в форме плоского цилиндра [17]. Для таких систем обнаружены уникальные динамические свойства [18], в частности, неньютоновский характер динамики ядра вихря [19; 20]. Ожидается, что использование таких частиц позволит создать новое поколение устройств записи и обработки информации [21]. В работе [22] показана возможность существования вихревых состояний со сложной структурой вихревого ядра наряду со слабонеодно-

родными и стандартными вихревыми состояниями, известных при слабом дипольном взаимодействии.

Целью настоящей работы является численное исследование основного состояния ферромагнитных наноточек в зависимости от их геометрии и материальных параметров.

Постановка проблемы. Уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта, описывающее динамику намагниченности $\mathbf{M}$ ферромагнитной системы, имеет вид

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{|\gamma|}{(1+\lambda^2)} \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{|\gamma|}{M_s} \frac{\lambda}{(1+\lambda^2)} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

где γ – гиромагнитное отношение; λ – параметр затухания; M_s – намагниченность насыщения; $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ – эффективное магнитное поле, которое задается соотношением

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\frac{\partial \mathcal{N}}{\partial \mathbf{M}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathcal{N}}{\partial (\partial \mathbf{M} / \partial \mathbf{r})}. \quad (2)$$

Микромагнитная модель дает феноменологическое описание системы магнитных моментов как континуальной среды. При этом намагниченность является непрерывной функцией координат

$$\mathbf{M} = M_s \cdot \mathbf{m}(x, y, z), \quad (3)$$

где $\mathbf{m}$ – единичный вектор, указывающий направление намагниченности в данной точке. В рамках микромагнитной модели предполагается, что магнетик является однородным и намагниченность насыщения – постоянная величина. Тогда полная энергия магнитной системы будет функционалом намагниченности. В ферромагнитных материалах полная энергия системы может быть представлена в виде суммы следующих слагаемых:

$$E_{\text{tot}} = E_e + E_a + E_z + E_d, \quad (4)$$

где E_e – обменная энергия; E_a – энергия магнитной анизотропии; E_z – энергия Зеемана; E_d – энергия размагничивающего поля. Каждое магнитное состояние системы является локальным минимумом функционала (4). Последний энергетический вклад E_d является ответственным за формирование ферромагнитных вихрей.

Плотность гамильтониана, соответствующая полной энергии (4), в общем случае выбирается в виде

$$\mathcal{N} = \frac{1}{2} \alpha \left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{r}} \right)^2 - \frac{1}{2} \beta (\mathbf{M} \mathbf{l})^2 - \mathbf{M} \mathbf{H} + \frac{1}{2} \mathbf{M} \mathbf{H}_m, \quad (5)$$

где $\alpha = 2A/M^2$ – параметр обмена (A – параметр обмена, эрг/см); $\beta = 2K_1/M^2$ – величина анизотропии (K_1 – константа одноосной магнитной анизотропии, эрг/см³); $\mathbf{l}$ – направление оси анизотропии; $\mathbf{H}$ – внешнее магнитное поле; $\mathbf{H}_m$ – размагничивающее поле формы образца. При численном моделировании внешнее магнитное поле на систему не налагалось, что соответствует отсутствию в (5) зеемановской энергии.

Численное моделирование основного состояния системы проводилось с использованием пакета трехмерного микромагнитного моделирования OOMMF для двух типов геометрии образца – кубической и эллипсоидальной с простыми кубическими решетка-

ми. При моделировании были использованы материальные параметры пермаллоя и материалов типа SmCo, допускающие значения одноосной анизотропии до 10^8 erg/cm^3 . Для пермаллоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ параметр обмена $A = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}$ (в системе СИ $A^{\text{SI}} = 2,6 \cdot 10^{-11} \text{ J/m}$), намагниченность насыщения $M_s = 8,6 \cdot 10^2 \text{ G}$ ($M_s^{\text{SI}} = 8,6 \cdot 10^5 \text{ A/m}$). Для SmCo $A = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ erg/cm}$, $M_s = 9 \cdot 10^2 \text{ G}$. Константа одноосной магнитной анизотропии K_1 изменялась в диапазоне: для пермаллоя $K_1 = \pm(10^{-2} - 10^4) \text{ erg/cm}^3$ ($K_1^{\text{SI}} = \pm(10^{-3} - 10^3) \text{ J/m}^3$) и для SmCo $K_1 = \pm(10^5 - 10^8) \text{ erg/cm}^3$. Здесь $K_1 > 0$ соответствует анизотропии типа «легкая ось», а $K_1 < 0$ – анизотропии типа «легкая плоскость». Кубическая магнитокристаллическая анизотропия пермаллоя близка к нулю. Можно оценить изменение толщины доменной стенки $L_0 = (A/K_1)^{1/2}$, соответствующее выбранному диапазону K_1 . Для пермаллоя и SmCo оно составляет $L_0 = 10^{-2} - 10^{-5} \text{ m}$ и $L_0 = 10^{-6} - 10^{-7} \text{ m}$ соответственно. В обоих случаях размер образца меньше этой величины на несколько порядков.

Для реализации численного алгоритма образец разбивается на трехмерные ячейки. Локальные магнитные моменты задаются в узлах сетки, и полная энергия системы может быть вычислена как сумма по ячейкам. Размеры ячеек должны быть достаточно малы для корректного описания всех взаимодействий, входящих в (5). В частности, наиболее чувствительна к размеру сетки величина магнитостатической энергии. Плотность обменной энергии представляется в виде

$$E_{ai} = \sum_{j \in N_i} A_{ij} \frac{\mathbf{m}_i \cdot (\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_j)}{\Delta_{ij}^2}, \quad (6)$$

где N_i – набор состоящий из 6-ти ячеек, ближайших к ячейке с номером i ; $\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$ – единичный вектор, совпадающий с направлением намагниченности в данной точке; A_{ij} – параметр обмена между ячейками с номерами i и j ; Δ_{ij} – шаг дискретизации между i -й и j -й ячейками. Энергия анизотропии имеет вид

$$E_{an} = K_1 \sum_i (1 - \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{a}_i). \quad (7)$$

Направление легкой оси одноосной анизотропии выбирается перпендикулярно плоскости наноточки. Расчет размагничивающего энергетического члена основывается на допущении, что намагниченность

постоянна в каждой ячейке. Вклад магнитостатической энергии определяется формулой

$$E_d = - \sum_{\alpha, \beta} \mathbf{M}_{\alpha} N_{\alpha\beta} \mathbf{M}'_{\beta} V. \quad (8)$$

Усредненные размагничивающие факторы $N_{\alpha\beta}$ вычисляются с использованием соотношений из работ [23; 24].

Результаты численного моделирования (пермаллой). При проведении численного моделирования наноточек использовался фиксированный шаг сетки разбиения $\Delta = 5 \text{ nm}$. Однако для улучшения читаемости результатов на приведенных далее рисунках отображалась лишь часть магнитных моментов из общего массива. При этом область, приведенная на всех рисунках, соответствует всему образцу.

Эллипсоидная геометрия. Толщина наноточек фиксировалась и составляла 10 nm . Численное моделирование показало, что до размеров $50 \times 50 \text{ nm}$ (сфероидные наноточки) в основном состоянии реализуется однородная намагниченность образца (рис. 1).

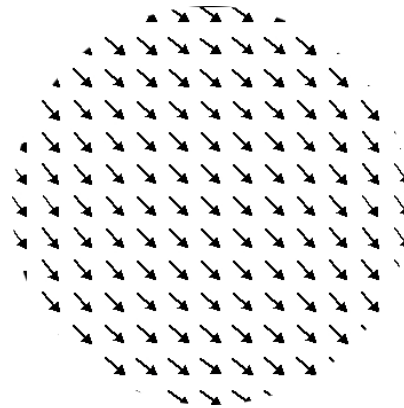


Рис. 1. Однородная намагниченность в основном состоянии для критического размера наноточки $50 \times 50 \text{ nm}$; $K_1 = 10^2 \text{ erg/cm}^3$

Интервал от 50 до 100 nm является переходной областью размеров, в которой происходит вырождение основного состояния, и наряду с однородной намагниченностью становится возможным формирование вихрей и антивихрей. От 100 до 500 nm вихревой состояние равновесной конфигурации становится доминирующим (рис. 2).

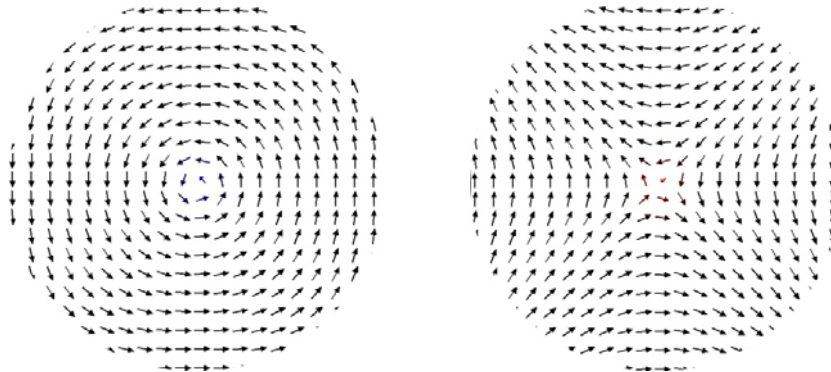


Рис. 2. Вихревое и антивихревое (справа) состояние при размере наноточки $300 \times 300 \text{ nm}$; $K_1 = 10^3 \text{ erg/cm}^3$

Начиная с размера 600 nm наблюдается стабилизация вихря в основном состоянии наряду с исчезновением вырождения. При любом размере образца эффектов зависимости топологии основного состояния системы от величины и знака константы одноосной магнитной анизотропии K_1 не выявлено.

Кубическая геометрия. Вихревое состояние в кубической геометрии наноточки из пермаллоя оказывается возможным только при переходе через критический размер около 250 nm. При меньших размерах, как и в случае эллипсоида, имеет место состояние с однородной намагниченностью. В данной геометрии величина и знак одноосной анизотропии по-прежнему не оказывает влияния на топологию равновесной конфигурации.

Результаты численного моделирования (SmCo).

Эллипсоидная геометрия. Размер наноточки 50 nm: при переходе через $K_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$ происходит скачок направления намагниченности на $\pi/2$ с сохранением ее однородности. Вихревых состояний в этом случае не возникает. В легкоплоскостном случае в районе $K_1 = -1,5 \cdot 10^7 \text{ erg/cm}^3$ возникает стабильный вихрь при практически полном отсутствии вырождения (рис. 3).

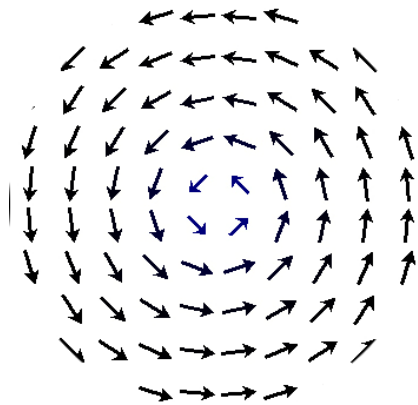


Рис. 3. Вихревое состояние наноточки SmCo с размером 50×50 nm; $K_1 = -1,5 \cdot 10^7 \text{ erg/cm}^3$

Размер наноточки 100 nm: при переходе через $K_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$ ситуация аналогична предыдущему случаю. При $K_1 = -(10^5 - 10^8) \text{ erg/cm}^3$ основное состояние стабильное, безвихревое и невырожденное. При размере 200 nm, начиная со значений константы анизотропии $K_1 = 10^6 \text{ erg/cm}^3$, основное состояние становится стабильно вихревым без вырождения. В районе $K_1 = 10^6 \text{ erg/cm}^3$ происходит скачкообразный поворот намагниченности на $\pi/2$. В легкоплоскостном случае при $K_1 = -10^6 \text{ erg/cm}^3$ происходит стабилизация вихря. При анизотропии более $K_1 = -10^6 \text{ erg/cm}^3$ наиболее вероятным оказывается многовихревое состояние (рис. 4).

Кубическая геометрия. 50 nm: в районе $K_1 = 10^6 \text{ erg/cm}^3$ происходит скачок направления намагниченности на $\pi/2$ с сохранением ее однородности. Вихревые состояния в такой ситуации отсутствуют. Основное состояние остается однородным при любых значениях константы анизотропии в диапазоне $K_1 = -(10^5 - 10^8) \text{ erg/cm}^3$.

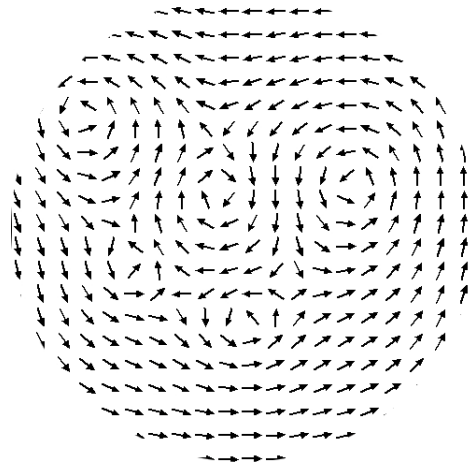


Рис. 4. Многовихревое состояние при размере наноточки SmCo 200×200 nm; $K_1 = -2 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$

100 nm: в легкоосном случае стабильные вихри возникают при $K_1 = 10^5 \text{ erg/cm}^3$. При больших K_1 наблюдается скачкообразный переход в состояние с однородной намагниченностью. В легкоплоскостном случае при $K_1 = -(10^4 - 10^8) \text{ erg/cm}^3$ основное состояние вырождается с возможностью возникновения как вихревого, так и безвихревого состояния. При размере наноточки 200 nm в районе $K_1 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$ основное состояние приобретает скирмионоподобный характер (рис. 5).

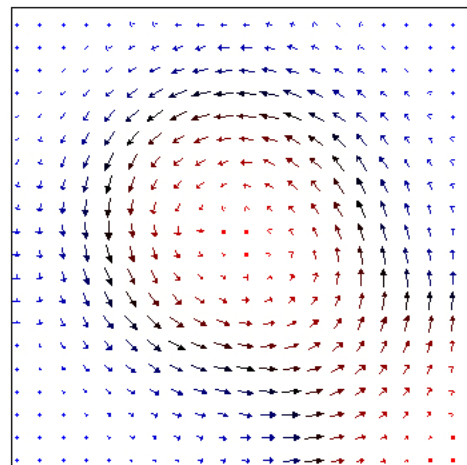


Рис. 5. Скирмионоподобное состояние в легкоосной наноточке SmCo 200×200 nm; $K_1 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$

Заключение. В работе проведено микромагнитное моделирование основного состояния наноточек с материальными параметрами пермаллоя и SmCo. Моделирование производилось для двух геометрий системы – эллипсоидной и кубической с одноосной константой анизотропии, которая изменялась в диапазоне $K_1 = \pm(10^{-2} - 10^4) \text{ erg/cm}^3$ для пермаллоя и $K_1 = \pm(10^5 - 10^8) \text{ erg/cm}^3$ для SmCo. Верхняя граница диапазона $K_1 = 10^4 \text{ erg/cm}^3$ соответствует технологически реализуемой одноосной анизотропии у пермаллоя. Установлено наличие переходной области размеров наноточек, при которой становится возможна релаксация системы магнитных моментов к вихревому

состоянию. Показана зависимость переходной области от геометрии системы, которая для кубической геометрии в несколько раз превосходит эллипсоидный случай. Влияние величины константы одноосной анизотропии в случае пермаллоя не оказывает заметного влияния на характер основного состояния, в то время как у SmCo одноосная анизотропия в определенной области значений приводит к возникновению стабильных вихревых конфигураций в основном состоянии.

Библиографические ссылки

1. Синтез и исследование магнитных характеристик нанокристаллических пленок кобальта / Б. А. Беляев [и др.] // ФТТ. 2008. Т. 50. С. 650–656.
2. Micromagnetic simulation of magnetization reversal in small particles with surface anisotropy / W. Scholz [et al.] // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 95, no. 11. P. 6807–6809.
3. Micromagnetic modelling of ferromagnetic cones / R. P. Boardman [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 312, no. 1. P. 234–238.
4. Micromagnetic simulations and analytical description of magnetic configurations in nanosized magnets / M. Kisielewski [et al.] // Physica B. 2006. Vol. 372. P. 316–319.
5. Магнитные свойства массивов эпитаксиальных нанодисков Co, упакованных на атомарно-гладких и vicинальных подложках Si / Л. А. Чеботкевич [и др.] // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 2152–2156.
6. Влияние числа нанодисков в двумерных массивах на процессы перемагничивания / М. Е. Стеблый [и др.] // ФТТ. 2013. Т. 55. С. 705–708.
7. Перемагничивание эллиптических нанодисков Co/Si/Co полем зонда магнитно-силового микроскопа / В. Л. Миронов [и др.] // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 2153–2158.
8. Single-domain circular nanomagnets / R. P. Cowburn [et al.] // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83. P. 1042–1045.
9. Magnetic normal modes in ferromagnetic nanoparticles: A dynamical matrix approach / M. Grimsditch [et al.] // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. P. 054409–054415.
10. K. Rivkin, L. E. DeLong, J. B. Ketterson. Microscopic study of magnetostatic spin waves // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 10E309–10E312.
11. Donahue M. J., Porter D. G. Interagency Report NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 1999.
12. Scalable parallel micromagnetic solvers for magnetic nanostructures / W. Scholz [et al.] // Comp. Mater. Sci. 2003. Vol. 28. P. 366–383.
13. Беляев Б. А., Изотов А. В., Лексиков А. А. Микромагнитный расчет равновесного распределения магнитных моментов тонких пленок // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 1549–1556.
14. Коршунов С. Е. Фазовые переходы в двумерных системах с непрерывным вырождением // УФН. 2006. № 176. С. 233–274.
15. Usov N. A., Peschany S. E. Magnetization curling in a fine cylindrical particle // J. Magn. Magn. Mater. 1993. Vol. 118. P. 290–294.

16. Usov N. A., Peschany S. E. Vortex magnetization distribution in a thin ferromagnetic cylinder // Fiz. Met. Metalloved. 1994. Vol. 12. P. 1–13.

17. Тонкий ферромагнитный нанодиск в поперечном магнитном поле / В. П. Кравчук, Д. Д. Шека // ФТТ. 2007. Т. 49. С. 1834–1841.

18. R. Skomski. Advanced Magnetic Nanostructures / ed. by D. J. Sellmyer and R. Skomski // J. Phys.: Condens. Matter 15. R841. Springer, Berlin, 2006.

19. Неньютоновская динамика быстрого движения магнитного вихря / Б. А. Иванов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 190–195.

20. О низкочастотном резонансе магнитных вихрей в микро- и нанопятнах / П. Д. Ким [и др.] // ФТТ. 2015. Т. 57. С. 29–36.

21. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics // J. of Phys D-Applied Physics. 2010. Vol. 43. P. 264001–264007.

22. Магнитные вихри в малых частицах ферромагнетиков с сильным дипольным взаимодействием / В. Е. Киреев, Б. А. Иванов // Письма в ЖЭТФ. 2011. № 94. С. 330–334.

23. Aharoni A. Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 3432–3434.

24. Newell A. J., Williams W., Dunlop D. J. A Generalization of the Demagnetizing Tensor for Nonuniform Magnetization // J. Geophysical Research – Solid Earth. 1993. Vol. 98. P. 9551–9555.

References

1. Belyaev B. A., Izotov A. V., Kiparisov S. Y., Skomorohov G. V. [Synthesis and studying of magnetic properties of nanocrystalline cobalt films]. FTT. 2008, Vol. 50, P. 650–656 (In Russ.).
2. Scholz W., Suess D., Schrefl T., Fidler J. Micromagnetic simulation of magnetization reversal in small particles with surface anisotropy. J. Appl. Phys. 2004, Vol. 95, No. 11, P. 6807–6809.
3. Boardman R. P., Fangohr H., Fairman M. J., Zimmermann J., Cox S. J., Zhukov A. A., P. A. J. de Groot. Micromagnetic modelling of ferromagnetic cones. J. Magn. Magn. Mater. 2007, Vol. 312, No. 1, P. 234–238.
4. Kisielewski M., Maziewski A., Zablotskii V., Stefanowicz W. Micromagnetic simulations and analytical description of magnetic configurations in nanosized magnets. Physica B. 2006, Vol. 372, P. 316–319.
5. Chebotkevich L. A., Yermakov K. S., Ognev A. V., Pustovalov Y. V. [The magnetic properties of epitaxial arrays nanodisks Co, packed on atomically smooth and vicinal Si substrates]. FTT. 2011, Vol. 53, P. 2152–2156 (In Russ.).
6. Steblyi M. Y., Kolesnikov A. G., Ognev A. V., Samardak A. S., Chebotkevich L. A. [Influence of nanodisks in two-dimensional array on the magnetization reversal processes]. FTT. 2013, Vol. 55, P. 705–708 (In Russ.).
7. Mironov V. L., Fraerman A. A., Gribkov B. A., Yermolaeva O. L., Gusev S. A., Vdovichev S. N.

- [Reversal elliptic nanodisks Co / Si / Co magnetic field probe force microscope]. *FTT*. 2010, Vol. 52, P. 2153–2158 (In Russ.).
8. Cowburn R. P., Koltsov D. K., Adeyeye A. O., Welland M. E., Tricker D. M. Single-domain circular nanomagnets. *Phys. Rev. Lett.* 1999, Vol. 83, P. 1042–1045.
 9. Grimsditch M., Giovannini L., Monotcello F., Nizzoli F., Leaf G. K., Kaper H. G. Magnetic normal modes in ferromagnetic nanoparticles: A dynamical matrix approach. *Phys. Rev. B*. 2004, Vol. 70, P. 054409–054415.
 10. Rivkin K., DeLong L. E., Ketterson J. B. Microscopic study of magnetostatic spin waves. *J. Appl. Phys.* 2005, Vol. 97, P. 10E309–10E312.
 11. Donahue M. J., Porter D. G. Interagency Report NISTIR 6376. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1999.
 12. Scholz W., Fidler J., Schrefl T., Suess D., Dittrich R., Forster H., Tsiantos V. Scalable parallel micromagnetic solvers for magnetic nanostructures. *Comp. Mater. Sci.* 2003, Vol. 28, P. 366–383.
 13. Belyaev B. A., Izotov A. V., Leksikov An. A. [Micromagnetic calculation of the equilibrium distribution of the magnetic moments of thin films]. *FTT*. 2009, Vol. 52, P. 1549–1556 (In Russ.).
 14. Korshunov S. Y. [Phase transitions in two-dimensional systems with continuous degeneracy]. *UFN*. 2006, Vol. 176, P. 233–274 (In Russ.).
 15. Usov N. A., Peschany S. E. Magnetization curling in a fine cylindrical particle. *J. Magn. Magn. Mater.* 1993, Vol. 118, L290–294.
 16. Usov N. A., Peschany S. E. Vortex magnetization distribution in a thin ferromagnetic cylinder. *Fiz. Met. Metalloved.* 1994, Vol. 12, P. 1–13.
 17. Kravchuk V. P., Sheka D. D. [Thin ferromagnetic nanodisks in the transverse magnetic field]. *FTT*. 2007, Vol. 49, P. 1834–1841 (In Russ.).
 18. Skomski R., *Phys J. Condens. Matter* 15, R841 (2006); *Advanced Magnetic Nanostructures*, Ed. by D. J. Sellmyer and R. Skomski, Springer, Berlin, 2006.
 19. Ivanov B. A., Avanesyan G. G., Hvalkovski A. V. [Non-Newtonian dynamics of the fast motion of a magnetic vortex]. *Pis'ma v ZhETF*. 2010, Vol. 91, P. 190–195 (In Russ.).
 20. Kim P. D., Orlov V. A., Prokopenko V. S., Zamay S. S., Prinz V. Ya., Rudenko R. Yu., Rudenko T. V. [About the low-frequency resonance of magnetic vortices in micro- and nanospot]. *FTT*. 2015, Vol. 57, P. 29–36 (In Russ.).
 21. Kruglyak V. V., Demokritov S. O., Grundler D. Magnonics. *J. of Phys D-Applied Physics*. 2010, Vol. 43, P. 264001–264007.
 22. Kireyev V. Y., Ivanov B. A. [Magnetic vortices in small ferromagnetic particles with a strong dipole interaction]. *Pis'ma v ZhETF*. 2011, Vol. 94, P. 330–334 (In Russ.).
 23. Aharoni A. Demagnetizing factors for rectangular ferromagnetic prisms. *J. App. Phys.* 1998, Vol. 83, P. 3432–3434.
 24. Newell A. J., Williams W., Dunlop D. J. A Generalization of the Demagnetizing Tensor for Nonuniform Magnetization. *J. Geophysical Research – Solid Earth*. 1993, Vol. 98, P. 9551–9555.

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ
НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ**

И. Я. Шестаков, О. В. Раева *

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru

В производстве деталей летательных аппаратов применяются гальванические процессы, в результате которых происходит загрязнение сточных вод ионами металлов. В настоящее время существует большое количество способов очистки воды и водных растворов: механические, химические, электрические, физические, биологические, комбинированные и др. Например, для очистки воды от железа эффективно используется отстаивание, для очистки от меди, никеля, хрома (VI) широко применяют электрокоагуляцию, ионообменные технологии, биологическую очистку и т. д. Сточные воды гальванических производств содержат совокупность различных ионов металлов при концентрации последних 0,5 мг/л и менее. Исследований по комплексной очистке воды от ионов металлов при таких условиях недостаточно.

Представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды от ионов металлов двумя способами – электрохимическим и электрохимическим с барботажем воздухом. Электрохимическое воздействие заключалось в пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых разнородных электродов (нержавеющая сталь 12X18H10T, титановый сплав ОТ 4-0). Барботирование очищаемой воды проводили воздухом, который пропускали через очищаемую воду. Наибольшая степень очистки воды достигается при электрохимическом способе с барботажем воздухом, что связано с неравномерным распределением напряженности электрического поля на границе раздела фаз.

При этом способе степень очистки воды возрастает: от ионов кадмия – в 2,9 раза, меди – в 1,1 раза, никеля – в 5 раз, хрома – в 1,2 раза и железа – в 1,1 раза. Удельные энергозатраты составляют 1,8 (кВт·ч)/м³. В то время как при очистке электрохимическим способом с применением нерастворимых электродов и переменного тока удельные энергозатраты составляют 3,5–4 (кВт·ч)/м³.

Ключевые слова: вода, электрохимическое воздействие, барботирование воздухом, напряженность, переменный ток.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 776–780**THE ELECTRIC FIELD INTENSITY INFLUENCE ON WATER CLEANING
FROM METAL IONS AT THE INTERPHASE BOUNDARY**

I. Ya. Shestakov, O. V. Raeva *

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru

In the manufacture an aircraft parts electroplating processes are used which result in the contamination of wastewater metal ions. Currently there is a large number of water and aqueous solutions purification methods - mechanical, chemical, electrical, physical, biological, combined method, etc. For example, for water purification from iron depending from copper, nickel, chromium (VI) is used effectively. Also electro-coagulation, ion exchange technology, biological treatment, etc are widely used. Waste water of electroplating industry contains a collection of different metal ions at concentrations of 0.5 mg/l or less. Research on integrated water purification from metal ions under these conditions is not enough.

The article presents the results of experimental studies of water cleaning from metal ions using two different methods – electrochemical and electrochemical air bubbling. Electrochemical effect was to purify water passing through the asymmetric alternating current using insoluble heterogeneous electrodes (stainless steel 12X18H10T, titanium alloy OT 4-0). The treated water bubbling used air which has passed through purified water. The highest efficiency of water cleaning is achieved by electrochemical method with air bubbling due to the uneven distribution of the electric field intensity at the interphase boundary.

This method increases water cleaning efficiency: from cadmium ions in 2.9 times, copper – 1.1, nickel – 5, chromium – 1.2, and iron – 1.1. Specific power consumption makes up 1.8 (kW·h)/m³ while electrochemical cleaning method with the insoluble electrodes and alternating current the specific power consumption is 3.5–4 (kW·h)/m³.

Keywords: water, electrochemical treatment, air bubbling, intensity, AC current.

Введение. В производстве деталей летательных аппаратов применяются гальванические процессы, в результате которых происходит загрязнение сточных вод ионами металлов. В настоящее время существует большое количество способов очистки воды и водных растворов: механические, химические, электрические, физические, биологические, комбинированные и др. [1]. Например, для очистки воды от железа эффективно используется отстаивание, для очистки от меди, никеля, хрома (VI) широко применяют электрокоагуляцию, ионообменные технологии, биологическую очистку и т. д. Сточные воды гальванических производств содержат совокупность различных ионов металлов при концентрации последних 0,5 мг/л и менее. Исследований по комплексной очистке воды от ионов металлов при таких условиях недостаточно.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды от ионов металлов с использованием нерастворимых разнородных электродов при барботировании воздухом.

Из литературных источников [2–11] известно, что процесс очистки идет сверху раствора, что обусловлено тем, что на границе раздела двух фаз (воздух–раствор) можно выделить пограничный слой, так называемую поверхностную или пограничную фазу. Она обладает избытком свободной энергии по сравнению с каждой из граничащих фаз. Отношение этой энергии на единицу площади связано с силой поверхностного натяжения. Процесс очистки в верхних слоях идет быстрее, чем в нижних, что связано с нерав-

номерным распределением напряженности электрического поля на границе раздела фаз [3].

Модуль вектора напряженности и его составляющие для различных углов смачивания воды материала электродов рассчитываются по формулам [4]

$$E_n = (1 + (\cos^2 \theta / 10)) \cdot (E_{cp} / \xi) \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

$$E_t = (1 + (\cos^2 \theta / 10)) \cdot E_{cp} \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$E = (1 + (\cos^2 \theta / 10)) \cdot E_{cp} \cdot ((\sin^2 \alpha / \xi) + \cos^2 \alpha)^{0.5}, \quad (3)$$

где E_n , E_t – нормальная и тангенциальная составляющие модуля вектора напряженности, В/м; E – модуль вектора напряженности электрического поля на границе раздела фаз в произвольной точке поверхности, В/м; E_{cp} – средняя напряженность электрического поля, В/м, равная

$$E_{cp} = U/d, \quad (4)$$

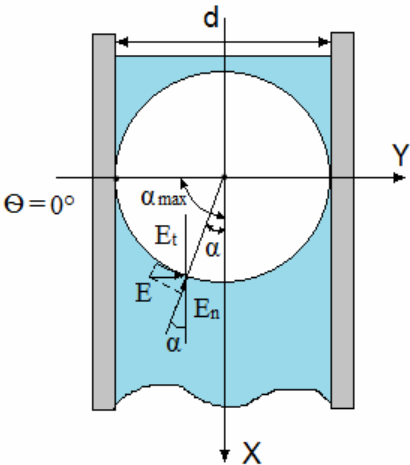
где U – напряжение на клеммах электродов, В; d – межэлектродное расстояние, м; ξ – относительная диэлектрическая проницаемость воды; θ – угол смачивания воды материала электродов; α – угловая координата выбранной точки на границе раздела фаз.

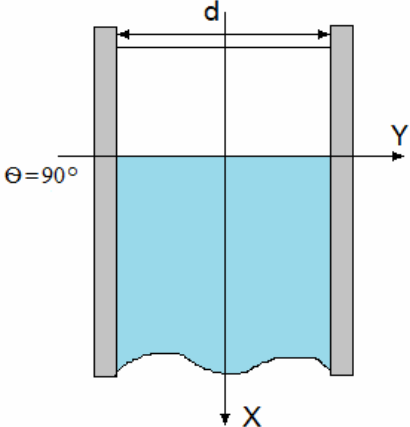
Результаты расчета модуля вектора напряженности и его составляющих по формулам (1)–(4) для случая полного ($\theta = 0^\circ$) и неполного смачивания воды материала электродов ($\theta = 90^\circ$) приведены в табл. 1.

Зависимость модуля вектора напряженности электрического поля от угла α при различных углах θ представлена на рис. 1.

Таблица 1

Значения модуля вектора напряженности и его составляющих при различных углах θ и α

№ п/п	$\theta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	E_n , В/м	E_t , В/м	E , В/м	Примечание
1	0	0	0	513,4	513,4	
		30	3,2	444,6	444,6	
		60	5,5	256,7	256,7	
		90	6,3	0	6,3	

№ п/п	$\theta, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$E_n, \text{В/м}$	$E_t, \text{В/м}$	$E, \text{В/м}$	Примечание
2	90	–	–	–	466,7	

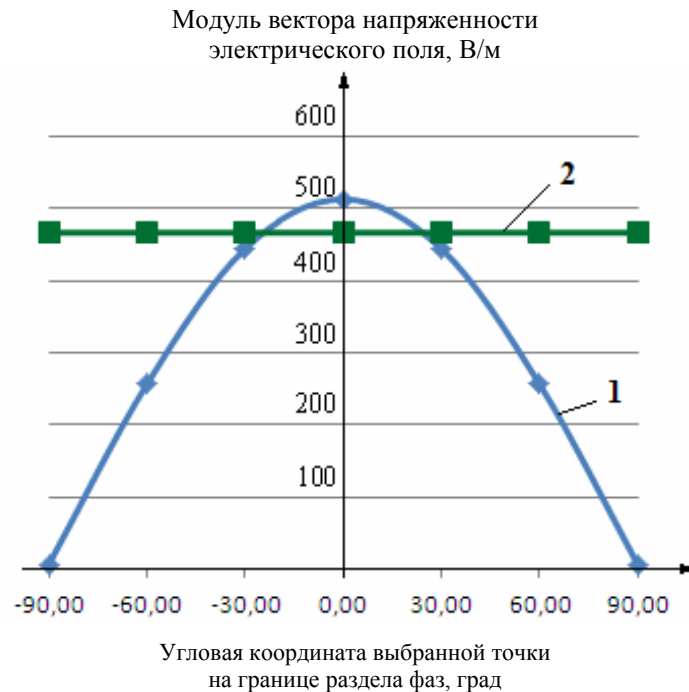


Рис. 1. Зависимость модуля вектора напряженности электрического поля от угла α при различных углах θ :
1 – полное смачивание воды ($\theta = 0^\circ$); 2 – неполное смачивание воды ($\theta = 90^\circ$)

Из рис. 1 видно, что напряженность электрического поля на границе раздела фаз распределена неравномерно. Максимальное значение напряженности достигается при краевом угле смачивания $\theta = 0^\circ$ в точке с угловой координатой на границе раздела фаз $\alpha = 0^\circ$. Плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля, согласно формуле [2; 3]:

$$i = \chi E,$$

где χ – электропроводность воды. В свою очередь, степень очистки пропорциональна плотности тока, следовательно, наибольшая степень очистки достигается при краевом угле смачивания $\theta = 0^\circ$ в точке с угловой координатой на границе раздела фаз $\alpha = 0^\circ$.

Результаты экспериментальных исследований.

Методика проведения экспериментов и принципиальная схема экспериментальной установки приведены в [12–16]. Далее представлены результаты исследований двух способов очистки – электрохимического и электрохимического с барботажем.

Результаты расчетов полученных экспериментальных данных представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Удельные энергозатраты при электрохимическом способе очистки воды составили $W_s = 0,47 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^3$, а при электрохимическом способе с барботажем воздухом $W = 1,8 \text{ (кВт}\cdot\text{ч)/м}^3$. Удельное количество пропускаемого через воду электричества $Q = 300 \text{ Кл/л}$.

Влияние способа очистки воды на степень очистки от ионов металлов

Ион металла	Способ очистки	
	Электрохимический	Электрохимический с барботажем
	Степень очистки, %	
Cd^{2+}	12,07	34,54
Cu^{2+}	34,25	37,25
Ni^{2+}	3,31	16,39
Cr^{6+}	7,17	8,63
Fe (общ.)	13,47	14,99

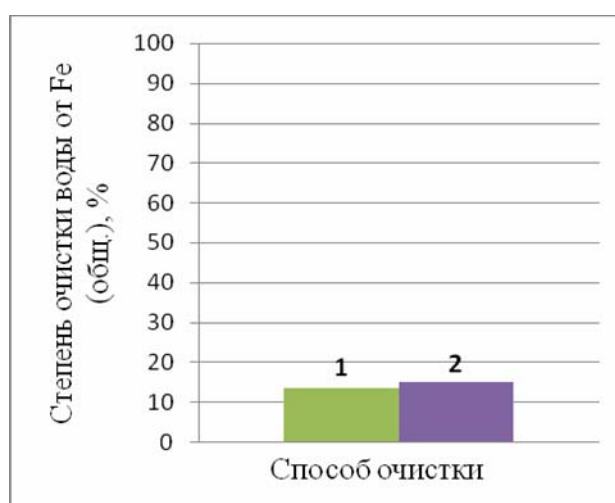
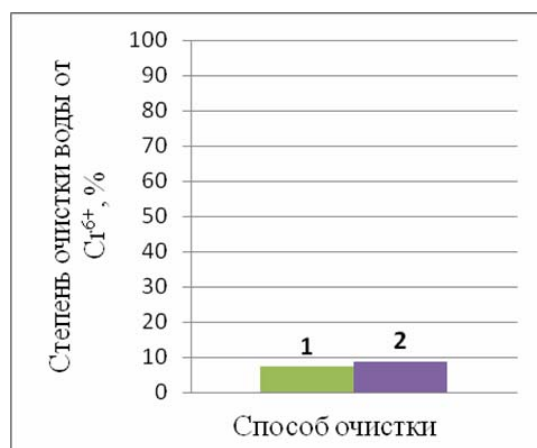
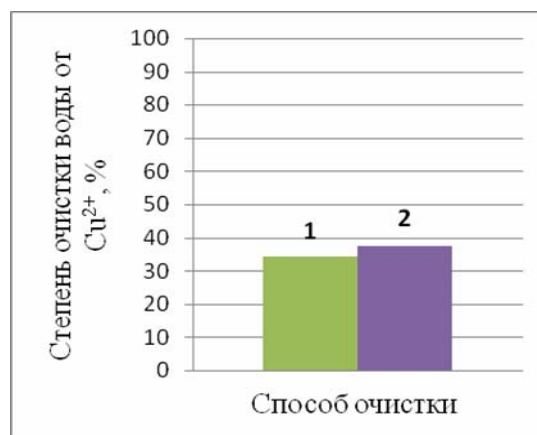
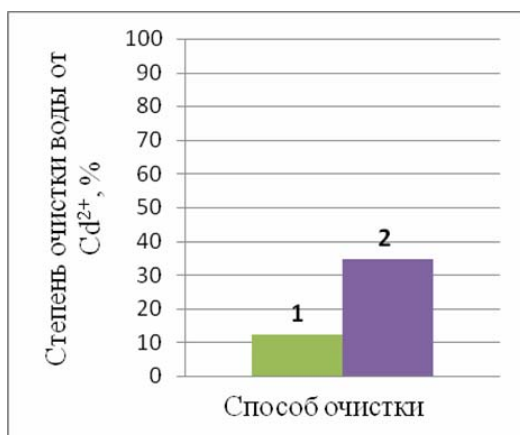


Рис. 2. Степень очистки воды от ионов металлов при различных способах очистки:
 1 – электрохимический способ; 2 – электрохимический способ с барботажем воздухом

Заключение. Результаты экспериментов показывают, что барботаж воды воздухом, как видно из рис. 2, приводит к увеличению степени очистки от ионов кадмия в 2,9 раза, меди – в 1,1 раза, никеля – в 5 раз, хрома – в 1,2 раза и железа – в 1,1 раза. Удельные энергозатраты составляют 1,8 (кВт·ч)/м³. В то время как при очистке электрохимическим способом с применением нерастворимых электродов и переменного тока удельные энергозатраты составляют 3,5–4 (кВт·ч)/м³. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили литературные данные.

Библиографические ссылки

1. Аксенов В. И. Водное хозяйство промышленных предприятий : справ. изд.: в 2 т. / под ред. В. И. Аксенова. М. : Теплотехник, 2005. 640 с.
2. Кравцов В. И. Равновесие и кинетика электродных реакций комплексных металлов. Л. : Химия, 1985. 208 с.
3. Корчинский Г. А. Влияние конвективной диффузии на электрохимическое выпрямление // Журнал физической химии. 1981. Т. № 55, № 10. С. 2650–2653.
4. Абрагам-Беккер. Теория электричества. М. : ГОНТИ, 1939. 259 с.
5. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М. : Физматгиз, 1959. 700 с.
6. Нefeldov В. Г., Матвеев В. В., Серебритский В. М. Динамика роста пузырьков при электролизе воды // Электрохимия. 1991. Т. 27, № 4. С. 490–495.
7. Перепелкин К. Е., Матвеев В. С. Газовые эмульсии. Л. : Химия, 1979. 200 с.
8. О структуре поверхностно-активных пузырьков в электролитах / В. Б. Шикин [и др.] // Электрохимия. 2007. Т. 43, № 6. С. 699–703.
9. Уваров Л. Б., Шаров С. И. Некоторые особенности электрохимической обработки с применением газожидкостных смесей // Электронная обработка металлов. 1976. № 1. С. 144–149.
10. Рязанов Г. А. Опыты и моделирование при излучении электромагнитного поля. М. : Наука, 1966. 208 с.
11. Костин Н. А. Кинетика и электродные процессы в водных средах. Киев : Наукова думка, 1983. 128 с.
12. Шестаков И. Я., Раева О. В. Оценка влияния коагуляции на степень очистки воды от ионов металлов // Вестник СибГАУ. 2013. № 1/47. С. 172–174.
13. Шестаков И. Я., Раева О. В. Очистка воды от ионов металлов электрохимическим воздействием переменным током при барботировании воздухом с последующей коагуляцией и отстаиванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2/54. С. 148–151.
14. Шестаков И. Я., Раева О. В. Электрохимический метод очистки сточных вод переменным током // Техника и технологии. 2011. № 4/3. С. 348–355.
15. Исследование очистки воды электрохимическим способом в нестационарном электрическом поле с последующей коагуляцией / И. Я. Шестаков [и др.] [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования : электрон. журн. 2013. № 1. URL: www.science-education.ru/107-8154.
16. Очистка воды от ионов металлов электрохимическим воздействием, отстаиванием и коагуляцией / И. Я. Шестаков [и др.] [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования : электрон. журн. 2013. № 1. URL: www.science-education.ru/107-8154.

References

1. Aksenov V. I. *Vodnoe khozyaystvo promyshlennykh predpriyatiy* [Water economy of industrial enterprises]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2005, 640 p.
2. Kravtsov V. I. *Ravnovesie i kinetika elektrodnykh reaktsiy kompleksnykh metallov* [Equilibrium and kinetics of electrode reactions of complex metals]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985, 208 p.
3. Korchinskiy G. A. [The influence of convective diffusion on the electrochemical rectification]. *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 1981, Vol. 55, No. 10, P. 2650–2653 (In Russ.).
4. Abagam-Bekker. *Teoriya elektrichestva* [Theory of electricity]. Moscow, GONTI Publ., 1939, 259 p.
5. Levich V. G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959, 700 p.
6. Nefedov V. G., Matveev V. V., Serebrikskiy V. M. [Dynamics of growth of bubbles during electrolysis of water]. *Elektrokhimiya*. 1991, Vol. 27, No. 4, P. 490–495 (In Russ.).
7. Perepelkin K. E., Matveev V. S. *Gazovye emul'sii* [Gas emulsion]. Leningrad, Khimiya Publ., 1979, 200 p.
8. Shikin V. B., Nazin S. S., Smirnova I. S., Bredikhin S. I. [On the structure of surfactant vesicles in electrolytes]. *Elektrokhimiya*. 2007, Vol. 43, No. 6, P. 699–703 (In Russ.).
9. Uvarov L. B., Sharov S. I. [Some features of electrochemical machining with the use of gas-liquid mixtures]. *Elektronnaya obrabotka metallov*. 1976, No. 1, P. 144–149 (In Russ.).
10. Ryzanov G. A. *Opyty i modelirovanie pri izluchении elektromagnitnogo polya* [Experiments and simulation in electromagnetic field radiation]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 208 p.
11. Kostin N. A. *Kinetika i elektrodnye protsessy v vodnykh sredakh* [Kinetics and electrode processes in aqueous media]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983, 128 p.
12. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. [Assessment of the impact on the degree of coagulation of water purification from metal ions]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 1(47), P. 172–174 (In Russ.).
13. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. [Water purification by metals ions electrochemical treatment alternating current with air bubbling followed by coagulation and sedimentation]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2(54), P. 148–151 (In Russ.).
14. Shestakov I. Ya., Raeva O. V. Electrochemical wastewater treatment method an alternating current. *Tekhnika i tekhnologii*. 2011, No. 4/3, P. 348–355.
15. Shestakov I. Ya., Raeva O. V., Nikiforova E. M., Eromasov R. G. [Study of water treatment by electrochemical method in non stationary electric field followed by coagulation]. 2013, No. 1. (In Russ.). Available at: www.science-education.ru/107-8154 (accessed 10.07.2015).
16. Shestakov I. Ya., Raeva O. V., Nikiforova E. M., Eromasov R. G. [Water purification from metal ions by electrochemical effects sedimentation and coagulation]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no. 1. (In Russ.). Available at: www.science-education.ru/107-8154 (accessed 10.07.2015).

РАЗДЕЛ
PART
4

ЭКОНОМИКА
ECONOMICS

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОММЕРЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ЦЕНЫ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ю. В. Ерыгин, Р. А. Беляков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: elroman1@yandex.ru

Инновационное развитие экономики России, определенное в качестве приоритета экономической политики государства, в условиях становления и развития рыночных отношений невозможно без формирования соответствующих рыночных инструментов, среди которых одним из основных является формирование рынка инноваций.

Важнейшей характеристикой инновационности экономики является инновационная активность предприятий и уровень спроса и предложения на разные виды инноваций. Для экономики современной России наиболее актуальна проблема технологического развития, что вызывает возросшую потребность в технологических инновациях. Решение данной проблемы во многом связано с неразвитостью рынка инновационных технологий и низким спросом со стороны бизнеса. Проблема заключается как в качестве разработок, так и в сложившейся в стране ситуации в потребностях бизнеса. Коммерциализация технологий определяется коммерческим их потенциалом, представляющим экономическую ценность в решении задач по повышению конкурентоспособности предприятий и выпуске конкурентоспособной на отечественном и зарубежных рынках инновационной продукции.

Определены требования к инновационным технологиям как товару; дано авторское определение коммерческого потенциала инновационной технологии; выделены факторы, влияющие на величину рыночной стоимости инновационной технологии, и условия формирования цены инновационной технологии. Рассмотрение коммерческого потенциала и определение цены инновационной технологии должно способствовать пониманию их значимости для решения проблем устойчивости бизнеса на конкурентном рынке.

Ключевые слова: инновационные технологии, коммерческий потенциал, цена инновационной технологии.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 782–786

DETERMINATION OF MARKET POTENTIAL AND PRICES OF INNOVATIVE TECHNOLOGY

Yu. V. Erygin, R. A. Belyakov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: elroman1@yandex.ru

The innovative development of Russian economy, defined as a priority for economic policy in the conditions of market relations formation and development, is impossible without the formation of appropriate market instruments, among which one of the main is the formation of market innovation.

The most important characteristics of the innovation economy is the innovative activity of enterprises and the level of demand and supply of different types of innovation. For the economy of modern Russia, the most pressing problem of technological development is the one which causes the increased demand for technological innovation. The solution to this problem largely depends on the underdevelopment of the market of innovative technologies and low demand from business. The problem is both caused by the development as well as by the situation in the country with business requirements. Technology Commercialization has determined their commercial potential, representing the economic value of improving the competitiveness of enterprises and production competitiveness on the domestic and foreign markets of innovative products.

Defined are the requirements to innovative technologies as goods; given is the definition of the commercial potential of innovative technologies; the factors, influencing the market value of innovative technologies are sorted out, as well as the formation conditions of the prices for innovative technologies. Consideration of the commercial potential and

pricing of innovative technology should contribute to the understanding of their importance for the stabilization of problems in business on the competitive market.

Keywords: innovative technologies, the commercial potential, the price of innovative technologies.

Введение. Произошедший в 90-е гг. прошлого столетия резкий спад промышленного производства, переориентация экономики на сырьевой тип привели к технологической деградации многих отраслей, и в первую очередь обрабатывающей промышленности. Уровень износа используемого оборудования по целому ряду отраслей достиг 70–80 %. Выросла зависимость от поставок зарубежного оборудования. Технологический уровень производства остановился на четвертом технологическом укладе, доля которого превышает 50 %. Технологии пятого технологического уклада сосредоточены только в военно-промышленном комплексе и авиакосмической отрасли. Их общая доля не более 10 %, а шестой технологический уклад пока не формируется. В то время как в развитых странах современный технологический уровень, по оценке академика Е. Н. Каблова, базируется на технологиях пятого технологического уклада (в США – более 60 %), и уже активно продвигаются в производство технологии шестого технологического уклада (в США их доля уже около 5 %) [1].

Для устранения накопившихся проблем, ликвидации технологического отставания от развитых стран в 2000-е гг. в России был объявлен курс на модернизацию и технологическое развитие экономики. Принят документ «Основы политики РФ в области развития науки и технологий». Утверждена государственная программа «Развитие науки и технологий на 2013–2020 годы». Реализуется ряд федеральных целевых программ, направленных на создание инновационных технологий.

Важной составляющей реализации задачи технологического развития экономики должно стать формирование рынка инновационных технологий.

Проблемы коммерциализации инновационных технологий. Анализ инновационной деятельности России и отдельных стран показал, что уровень инновационной активности промышленных предприятий в России не превышает 10 %, а удельный вес предприятий, осуществляющих технологические инновации, всего 8 %. В развитых странах доля предприятий, осуществляющих технологические инновации, постоянно растет и в настоящее время составляет: в Германии – более 65 %, в Швеции – 50 %, в Великобритании и Португалии – более 40 % [2].

Низкий уровень инновационных технологий и их внедрения в российскую практику связан с неготовностью большинства научно-технических разработок к процессу коммерциализации; низким уровнем патентной культуры и слабой заинтересованностью в защите объектов интеллектуальной собственности разработчиков новых технологий; отсутствием подтвержденного научно-технического уровня созданной технологии в сравнении с достигнутым мировым уровнем развития науки и техники; сложностью оценки коммерческого потенциала созданной технологии; неразвитостью инновационной инфраструкту-

ры; слабостью мер государственной поддержки; отсутствием необходимой нормативно-правовой базы коммерциализации технологий и др.

Важнейшей составляющей коммерциализации технологий является спрос на новые технологии со стороны бизнеса [3]. Практика показывает, что это один из проблемных вопросов развития инноваций в стране. Важнейшей составляющей спроса на инновации является заказчик, обладающий потребностью в конкретных видах инноваций. Ключевой здесь является потребность, выраженная в реализации определенных направлений по повышению эффективности производства и повышению конкурентоспособности предприятия и его продукции на рынке, особенно на международном. Имеющиеся исследования в области коммерциализации инноваций [4–7] показывают, что как раз многие российские предприятия не имеют четко определенных потребностей или не могут их реализовать вследствие невозможности доступа к современным технологиям или отсутствия финансовых возможностей. Причинами сложившейся ситуации являются:

- высокий уровень монополизации экономики и, соответственно, отсутствие необходимых условий для конкуренции на отечественном рынке инноваций;
- проблемы с обеспечением предприятий необходимым оборудованием, соответствующим требованиям мирового рынка;
- волатильность в настоящее время курсов валют и отсутствие долгосрочных программ развития;
- неразвитость технологической инфраструктуры в регионах, слабое инженеринговое обеспечение технологического перевооружения предприятий.

Понимая исключительную важность решения имеющихся проблем, руководством страны в последние годы принят ряд организационных и экономических мер по созданию условий для технологического развития экономики страны. Так, при Президенте Российской Федерации создан Совет по модернизации и инновационному развитию России. Распоряжением Правительства РФ от 19 марта 2014 г. № 398-р утвержден комплекс мер, направленных на отказ от использования устаревших и неэффективных технологий, переход на принцип наилучших доступных технологий и внедрение современных технологий [8]. С целью концентрации усилий на создание и использование прорывных технологий, учета интересов государства, науки и бизнеса по инициативе Правительства РФ в 2010 г. запущен механизм формирования национальных технологических платформ на принципах государственно-частного партнерства. В настоящее время сформированы 34 российские технологические платформы по важнейшим технологическим направлениям, которые будут определять технологическое развитие страны в ближайшей и далекой перспективе, в том числе биотехнологии, ядерные и радиационные технологии, новые материалы,

авиакосмические технологии, ИКТ, технологии возобновляемой энергетики и др. [9–11]. По инициативе Президента Российской Федерации В. В. Путина, объявленной в Послании к Федеральному Собранию 4 декабря 2014 г. [12], начинается реализация Национальной технологической инициативы – программы мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 г.

В рыночной экономике созданная инновационная технология может и должна быть представлена на рынке как товар.

Инновационная технология как товар должна обладать совокупностью критериев, отражающих определенные свойства, присущие инновационности:

во-первых, это должен быть продукт интеллектуальной деятельности, закрепленный в определенной форме интеллектуальной собственности (критерий наукоемкости);

во-вторых, он должен иметь конкурентные преимущества по сравнению с уже имеющимися технологиями и привести дополнительный экономический эффект потребителю (рост производительности труда, снижение энергоемкости, водо- и энергопотребления, сокращение воздействия на окружающую среду и др.) (критерий экономического эффекта реализации).

Для того, чтобы данная инновационная технология была востребована на рынке, она должна обладать рядом преимуществ:

– полное документальное оформление инновационной технологии, подтвержденное комплектом научно-технической документации (патентная чистота, экспериментальная отработка, сертификация технологии и т. п.);

– соответствие или опережение по параметрам (функциональное назначение, конструктивные особенности, используемые материалы и др.) лучших зарубежных и отечественных аналогов;

– наличие (или необходимость развития новой) материальной базы, комплектующих и информационного обеспечения.

Все эти требования обеспечивают комплексный подход, снижающий риски внедрения.

Коммерческий потенциал инновационной технологии. В рыночной экономике для бизнеса на первое место выходит экономическая целесообразность внедрения инновационных технологий, что предполагает необходимость оценки ее коммерческого потенциала. Исходя из анализа экономической литературы [13–15], было выявлено, что до настоящего времени не выработано понятие коммерческого потенциала инновационной технологии. Исследования в данной области [16; 17] позволили дать его определение. Коммерческий потенциал инновационной технологии – это комплексная характеристика потенциальных возможностей ее реализации и использования предприятиями определенного профиля деятельности, благодаря ее конкурентным преимуществам и новым условиям организации производства конкурентоспособной продукции с более высокой добавленной стоимостью. Таким образом, коммерческий потенциал формируется исходя:

– из соответствия приоритетным направлениям технологического развития конкретной отрасли промышленности;

– наличия конкурентных преимуществ, обеспечивающих добавленную стоимость в результате реализации на отечественном и зарубежном рынках;

– наличия определенного круга потребителей как конечной продукции, так и возможности участия в цепочке международного разделения труда;

– окупаемости инвестиционных затрат на внедрение технологии в экономически обоснованные сроки и получения коммерческой выгоды.

Цена инновационной технологии устанавливается исходя из переговоров продавца и покупателя и зависит от объективности оценки стоимости товара. В инновационной технологии как товаре при оценке стоимости должны рассматриваться две ее стороны:

– во-первых, оценка технологии как нового способа производства продукции, дающего определенные преимущества на конкурентном рынке (качество продукции, сокращение издержек производства и др.);

– во-вторых, оценка интеллектуальной собственности, заложенной в данную инновационную технологию и имеющей патентную защиту, обеспечивающей предприятию-потребителю технологическую монополию на рынке, особенно если продукция с данными параметрами не может быть произведена другим способом.

В нижнюю границу цены закладываются все издержки, связанные как с ее разработкой, так и с затратами, связанными с коммерциализацией (включая доход разработчиков, который определяется по договоренности). Верхняя граница цены зависит от вложенной интеллектуальной собственности и значимости инновационной технологии на рынке.

На величину рыночной стоимости инновационной технологии влияют следующие факторы: новизна технологии и ее конкурентные преимущества, соответствие мировому уровню; патентная защита и сроки правовой охраны основных технических решений (наличие ноу-хау, объем передаваемых прав на использование технологии); величина дополнительных затрат, связанных с внедрением технологии.

К базовым методам оценки относятся такие известные методы, как затратный, доходный, сравнительный (рыночный), в основе которых лежит оценка затрат на инновационные технологии, оценка будущих доходов у потребителя и сравнение с сопоставимыми аналогами.

Заключение. Развитие рынка инновационных технологий должно стать неотъемлемой частью инновационной деятельности на разных уровнях управления. Преодоление разрыва между спросом на инновации и их предложением во многом зависит от конкурентной среды, создаваемой на экономических рынках, и коммерческого потенциала инновационных технологий. Стимулирование коммерциализации технологических инноваций должно стать составляющей частью региональных инновационных систем, включая такие меры, как «принуждение» к инновациям через инструменты государственного управления инновационным развитием. Примером может служить

ряд принятых законодательств по закупке инновационной и высокотехнологичной продукции в рамках контрактной системы, где определены нормы закупки инновационной продукции для обеспечения государственных и муниципальных нужд.

Библиографические ссылки

1. Каблов Е. Н. Курсом в 6-й технологический уклад [Электронный ресурс] // NanoWeek. 2010. 15–22 февраля. №. 99. URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/kursom-v-6-oi-tehnologicheskii-uklad> (дата обращения: 09.06.2015).
2. Рейтинг стран мира по уровню расходов на НИОКР [Электронный ресурс] // Центр гуманитарных технологий. 26.05.2013 (последняя редакция: 07.07.2014). URL: <http://gtmarket.ru/ratings/research-and-development-expenditure/info> (дата обращения: 11.06.2015).
3. Зарубежные практики стимулирования спроса на инновации в рамках государственных закупок и закупок в компаниях с государственным участием [Электронный ресурс] // РБК. URL: http://www.rusventure.ru/ru/programm/analytics/docs/201504_RVC_practices_Cover_Interactive.pdf (дата обращения: 11.06.2015).
4. Артемьев Н. Е. Рынки технологии в мировом хозяйстве. М.: Наука, 1992. 220 с.
5. Кузнецова С. А., Маркова В. Д. Развитие инновационного рынка как механизма распространения наукоемкой продукции. Новосибирск, 2002. 107 с.
6. Научно-технологическое развитие Российской Федерации: состояние и перспективы / Л. Э. Миндели [и др.]; под ред. Л. Э. Миндели. М. 2010. 422 с.
7. Пак В. А. Анализ рынка технологии России [Электронный ресурс]. URL: <http://novainfo.ru/archive/14/analiz-rynka-tehnologii> (дата обращения: 10.06.2015).
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19.03.2014 г. № 398-р [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/media/files/41d4cc19757c1099b2b3.pdf> (дата обращения: 10.06.2015).
9. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации [Электронный ресурс]: Указ Президента Российской Федерации от 07 июля 2011 г. № 899. URL: <http://fasie.ru/zakonodatelstvo/ukazy-prezidenta-rf> (дата обращения: 10.06.2015).
10. Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы: федер. целевая программа [Электронный ресурс]. URL: <http://2014.fcpir.ru/> (дата обращения: 11.06.2015).
11. Перечень технологических платформ [Электронный ресурс]. URL: http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/de672f004ac039db8aeb8baf3367c32c/perechen_tp.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=de672f004ac039db8aeb8baf3367c32c (дата обращения: 10.06.2015).
12. Послание Президента Федеральному Собранию от 04.12.2014 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/47173> (дата обращения: 10.06.2015).

13. Егоров А. Ю. Рынок инновационных проектов: методология формирования, управления и развития / под общ. ред. проф. А. Ю. Егорова. М.: Палеотип, 2007. 236 с.

14. Конов Ю. П., Гончаренко Л. А. Рынок интеллектуальной собственности. М.: Экономика, 2010. 544 с.

15. Пугина Л. Н. Рынок инноваций в России // Наука и экономика. 2011. № (3) 7. С. 33–35.

16. Лобода В. А. Специфические черты рынка научно-технической продукции // Новости науки и технологий: информ.-аналит. журнал. 2008. № 1. С. 15–21.

17. Современные тенденции региональных рынков трансферта технологий / С. Ю. Солодовников [и др.] [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iovpani.spb.ru/poslednie-novosti/sovremennye-tendentsii-regionalnich-rinkov-transferta-technologiy.html> (дата обращения: 10.06.2015).

References

1. Kablov E. N. *Kursom v 6-oy tekhnologicheskiiy uk-lad* [Heading in the sixth technological order]. NanoWeek, 15-22 February 2014, No. 99. Available at: http://www.rusventure.ru/ru/programm/analytics/docs/201504_RVC_practices_Cover_Interactive.pdf (accessed 09.06.2015).
2. *Reyting stran mira po urovnyu raskhodov na NI-OKR. Tsentr gumanitarnykh tekhnologiy*. [Research and Development Expenditure Centre of Humanitarian Technologies] (In Russ.). Available at: <http://gtmarket.ru/ratings/research-and-development-expenditure/info> (accessed 11.06.2015).
3. *Zarubezhnye praktiki stimulirovaniya sprosa na innovatsii v ramkakh gosudarstvennykh zakupok i zakupok v kompaniyakh s gosudarstvennym uchastiem* [Foreign practice stimulate demand for innovation through public procurement and procurement in companies with state participation, RVC] (In Russ.). Available at: http://www.rusventure.ru/ru/programm/analytics/docs/201504_RVC_practices_Cover_Interactive.pdf (accessed 11.06.2015).
4. Artem'ev N. E. *Rynki tekhnologii v mirovom khozyaystve* [The technology markets in the world economy]. Moscow, Nauka Publ., 1992, 220 p.
5. Kuznetsova S. A., Markova V. D. *Razvitie innovatsionnogo rynka kak mekhanizma rasprostraneniya naukoemkoy produktsii* [The development of innovative market as a mechanism for distribution of high technology products]. Novosibirsk, 2002, 107 p.
6. Mindeli L. E., Kleeva L. P., Medvedeva T. Yu. *Nauchno-tekhnologicheskoe razvitie Rossiyskoy Federatsii: sostoyanie i perspektivy* [Scientific and technological development of the Russian Federation: Status and Prospects]. Moscow, 2010, 422 p.
7. Pak V. A. *Analiz rynka tekhnologii Rossii* [Analysis market technology of Russia] (In Russ.). Available at: <http://novainfo.ru/archive/14/analiz-rynka-tehnologii> (accessed 10.06.2015).
8. Order of the Government of the Russian Federation of 19 March 2014, No. 899-r (In Russ.). Available at:

<http://government.ru/media/files/41d4cc19757c1099b2b3.pdf> (accessed 10.06.2015).

9. On approval of the priority directions of science, technology and engineering in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation: Presidential Decree of July 7, 2011, No. 899 (In Russ.). Available at: <http://fasie.ru/zakonodatelstvo/ukazy-prezidenta-rf> (accessed 10.06.2015).

10. Federal Target Program "Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020" (In Russ.). Available at: <http://2014.fcpir.ru/> (accessed 11.06.2015).

11. *Perechen' tekhnologicheskikh platform* [The list of technology platforms] (In Russ.). Available at: http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/de672f004ac039db8aeb8baf3367c32c/perechen_tp.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=de672f004ac039db8aeb8baf3367c32c (accessed 10.06.2015).

12. Message from the President to the Federal Assembly of 04 December 2014 (In Russ.). Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/47173> (accessed 10.06.2015).

13. Egorov A. Yu. *Rynok innovatsionnykh proektov: metodologiya formirovaniya, upravleniya i razvitiya* [The market of innovative projects: methodology of formation, management and development]. Moscow, Paleotip Publ., 2007, 236 p.

14. Konov Yu. P., Goncharenko L. A. *Rynok intellektual'noy sobstvennosti* [The market of intellectual property]. Moscow, Ekonomika Publ., 2010, 544 p.

15. Pugina L. N. [The innovation market in Russia]. *Nauka i ekonomika*. 2011, No. 3 (7), P. 33–35 (In Russ.).

16. Loboda V. A. [Specific features of the market of scientific-technical products] *Novosti nauki i tekhnologii*. 2008, No. 1, P. 15–21 (In Russ.).

17. Solodovnikov S. Yu., Margaryan A. Sh., Sverlov A. S., Naumovich O. A. *Sovremennye tendentsii regional'nykh rynkov transferta tekhnologiy* [Modern trends in regional markets technology transfer] (In Russ.). Available at: <http://www.iovpani.spb.ru/poslednie-novosti/sovremennye-tendentsii-regionalnich-rinkov-transferta-tekhnologiy.html> (accessed 10.06.2015).

© Ерыгин Ю. В., Беяков Р. А., 2015

**ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ КАК ФАКТОР
ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Д. С. Ощепкова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: daria_343@mail.ru

В настоящее время стратегически важная отрасль российской экономики – аэрокосмическая промышленность нуждается в модернизации и переориентации на потребности современной экономики – экономики знаний. Для осуществления данной трансформации необходим квалифицированный творческий персонал, вовлеченный в отношения человеческого капитала. Объектом данного исследования являются отношения человеческого капитала (в аэрокосмической отрасли). Представлен анализ основных подходов к определению сущности человеческого капитала, проведена их классификация (деятельностный, доходный, инвестиционный, исторический). Через общие свойства систем (иерархичность, целостность, эмерджентность) доказано, что отношения человеческого капитала являются системой, в которой происходит превращение человеческого потенциала (запаса здоровья, знаний, навыков и пр.) в актив предприятия. Научная новизна заключается в выделении системообразующего элемента человеческого капитала – интеллектуальной собственности. В авторском определении интеллектуальная собственность представляет собой творческий подход работника к осуществлению трудовой деятельности, нестандартное использование средств производства, приводящее к повышению эффективности производственного процесса, формированию конкурентных преимуществ. Наличие интеллектуальной собственности может быть выражено в ответственном отношении к труду (стремлении работника выполнить трудовые операции качественно и точно в срок), новаторстве (рационализаторские предложения), инновационной деятельности. Сделан вывод о том, что управление человеческим капиталом (как системой экономических отношений) выходит за рамки управления персоналом и требует принципиально нового комплексного подхода, способного повысить конкурентоспособность аэрокосмической отрасли. Результаты данного исследования носят научно-прикладной характер и могут быть использованы в образовательном процессе и практической деятельности по управлению организациями аэрокосмической промышленности.

Ключевые слова: человеческий капитал, человеческий потенциал, интеллектуальная собственность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 787–791**HUMAN CAPITAL AS A SYSTEM
OF AEROSPACE ECONOMIC DEVELOPMENT**

D. S. Oshchepkova

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: daria_343@mail.ru

Currently, the strategically important sector of Russian economy – aerospace industry – needs modernization and reorientation on the needs of modern economy – the knowledge-based economy. To implement this transformation there is a need in qualified creative personnel involved in the relationship with the human capital. The object of this study is the relationship of human capital (in the aerospace industry). This paper presents the analysis of the main approaches to define the essence of human capital, their classification (activity, income, investment, historical). Through the general properties of systems (hierarchy, integrity, emergence) was proved that the relationship of human capital is a system in which occurs the transformation of human resources (total health, knowledge, skills, etc.) into the asset of the enterprise. Scientific novelty lies in the allocation of system-forming element of human capital – intellectual property. In the author's definition of intellectual property lies the creative approach to the implementation of employee work, non-standard use of the means of production, resulting in the increased efficiency of the production process, and formation of competitive advantage. The presence of intellectual property can be expressed in the responsible attitude to work (the desire of the employee to perform labour operations efficiently and on time), pioneering (rationalization

proposals), innovation activity. According to the article, the human capital management (as a system of economic relations) is beyond the scope of personnel management and requires a fundamentally new integrated approach that can improve the competitiveness of the aerospace industry. The results of this study are of scientific and applied character and can be used in the educational process and practices focused on the management of aerospace organizations.

Keywords: human capital, human potential, intellectual property.

Введение. Сегодня аэрокосмическое производство является стратегическим направлением развития российской экономики. С космосом Россия связывает свое будущее. Поддержание обороноспособности, развитие спутниковых систем связи, освоение космического пространства – далеко не полный перечень стратегических задач аэрокосмической промышленности, достижение которых невозможно без квалифицированного персонала. Длительное время большинство наукоемких отраслей экономики России испытывали «кадровый голод», обусловленный миграцией квалифицированных кадров либо нежеланием технических специалистов работать по специальности. Безусловно, для изменения сложившейся ситуации и развития аэрокосмического производства требуется принятие комплекса управленческих решений на макро- и микроуровнях, однако данные решения должны быть основаны на принципиально новом управленческом подходе и осознании новой роли работника в производственном процессе (человеческий капитал).

Содержание экономической категории «человеческий капитал». Экономическая категория «человеческий капитал» предполагает отношение к работнику как к активу организации (нуждающемуся в инвестициях и способному приносить прибыль).

Существующее многообразие толкований категории «человеческий капитал» можно сгруппировать в четыре подхода (см. таблицу).

В рамках деятельностного подхода определения человеческого капитала внимание акцентируется на применимости накопленного потенциала в деятельности, в рамках доходного – на возможности получать доход от реализации потенциала, в рамках инвестиционного – на необходимости инноваций в развитие человеческого потенциала. В трактовках, отнесенных к историческому подходу, человеческий капитал

представлен как результат развития отношения к работникам и их роли в производстве [6].

Изучив представленные в таблице подходы, можно сделать вывод, что все они лишь односторонне характеризуют человеческий капитал, и на сегодняшний день системный взгляд на сущность экономической категории, претендующей стать базовой, в научной литературе отсутствует.

Человеческий капитал как система экономических отношений. Как утверждает Р. С. Моисеев, любая экономическая категория выражает экономические отношения [7]. Человеческий капитал как экономическая категория представляет собой систему экономических отношений между работниками, их объединениями и фирмами. Целью функционирования данной системы является формирование и реализация под воздействием интеллектуальной составляющей человеческого потенциала в сфере общественного производства посредством осуществления высокопроизводительной деятельности, приводящей к росту дохода.

Стоит отметить, что в рамках данного определения необходимо различать человеческий потенциал и капитал.

Потенциал – средства, запасы, источники, имеющиеся в наличии и способные быть использованными, приведенными в действие для достижения цели какой-либо системы в определенной области [8]. Е. М. Хмелева считает, что современное экономическое знание заимствовало понятие «потенциал» из физики, где оно определяет количество энергии, которую накопила система и которую она способна реализовать в работе [9]. По аналогии с приведенным определением, человеческий потенциал можно определить как запас знаний, умений, навыков и способностей работника, обеспечивающий возможность получения дохода.

Подходы к определению сущности человеческого капитала

Подход	Сущность человеческого капитала	Представители
Деятельностный	Совокупность врожденных и приобретенных способностей, образования и квалификации, используемые при осуществлении трудовой деятельности [1]	Дж. С. Уолш, Л. С. Тороу, У. Боуэн, В. Н. Костюк, Т. Е. Дрок, Ю. П. Бойко
Доходный	Совокупность интеллектуальных способностей человека, позволяющих ему производить экономические блага более высокого качества и получать более высокий доход [2]	Г. Беккер, Т. Шульц, Ф. Махлуп, И. Фишер, Е. В. Бобкова, Н. А. Майорова, С. М. Климов
Инвестиционный	Запас знаний, здоровья, мотивации, способностей, накопленный за счет инвестиций и используемый в сфере общественного производства [3]	С. А. Дятлов, Е. Д. Цыренова, Р. И. Капелюшников, В. Т. Смирнов, И. В. Скоблякова, И. Т. Корогодин, А. Н. Добрынин
Исторический	Форма человеческой жизнедеятельности, возникшая вследствие развития эпох хозяйствования [4], движения общества к современному состоянию [5]	М. М. Критский, Л. Г. Симкина

Производственный процесс представляет собой соединение человеческого потенциала со средствами производства, предоставляемыми работнику хозяйствующим субъектом. Эффективность производственного процесса определяется наличием в трудовых отношениях интеллектуальной составляющей, которую предлагается определять как интеллектуальную собственность.

В современной науке категория «интеллектуальная собственность» используется в юридической и экономической областях знаний. При этом содержание интеллектуальной собственности сводится к результатам интеллектуальной деятельности. Правовые науки решают вопрос защиты прав правообладателей результатов интеллектуальной деятельности (А. И. Зенин [10], Л. В. Щенникова [11], Е. А. Суханов [12]), а экономические науки рассматривают вопросы их эффективного использования в хозяйственной деятельности (Ю. М. Осипов [13], А. А. Скобарев [14]). Однако результаты интеллектуальной деятельности вторичны по отношению к труду работника, их создание невозможно без творчества, повышенной осознанности деятельности и максимального использования человеческого потенциала. Именно эти аспекты составляют основу эффективной трудовой деятельности, приводящей к росту дохода.

Под интеллектуальной собственностью предлагается понимать системообразующий элемент отношений человеческого капитала, представляющий собой творчество и максимальное использование потенциала в осознанной трудовой деятельности.

Из теории систем следует, что любая система обладает тремя основными качествами: иерархичность, целостность, эмерджентность [15].

Иерархичность предполагает наличие структуры элементов, целостность – наличие взаимосвязи между элементами, а эмерджентность проявляется в появлении у системы свойств, не присущих ее элементам, их сумме.

Рассмотрим более подробно данные свойства применительно к человеческому капиталу как системе экономических отношений.

Иерархичность и целостность. Как ранее упоминалось, основными субъектами экономических отношений системы человеческого капитала являются работники и фирмы. Их деятельность направлена на формирование человеческого потенциала, его ка-

питализацию (реализацию возможности приносить доход), развитие и управление.

Каждый работник обладает уникальным набором человеческого потенциала. Организация «арендует» человеческий потенциал – осуществляет его использование за вознаграждение, при этом собственником потенциала остается работник.

От качества потенциала работников зависит конкурентоспособность товара или услуги, поэтому организации осуществляют инвестирование в развитие знаний, умений, навыков.

В общем виде система отношений человеческого капитала представлена на рис. 1.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что в рамках отношений человеческого капитала происходит взаимодействие структурных субъектов (работника и фирмы), направленное на капитализацию человеческого потенциала. Данный процесс отражает взаимосвязь субъектов. Однако стоит отметить, что он происходит под влиянием интеллектуальной составляющей, обеспечивающей синергетический эффект взаимоотношений.

Эмерджентность. Человеческий капитал по своей сути – высокоразвитая форма овеществления и экономического отчуждения личностных сил человека.

Однако стоит отметить, что основным отличием человеческого капитала от более ранних форм управления (рабочая сила, трудовые ресурсы, персонал) является наличие в данных отношениях интеллектуальной собственности (в вышеуказанном авторском определении).

Интеллектуальная собственность (ИС) существует во всех трудовых отношениях (во всех профессиях и формах занятости). Интеллектуальная собственность определяет нестандартный подход к использованию средств производства. Наличие интеллектуальной собственности может быть выражено в ответственном отношении к труду (стремлении работника выполнить трудовые операции качественно и точно в срок), новаторстве (рационализаторские предложения), инновационной деятельности.

На рис. 2 представлена экономическая модель, которая наглядно демонстрирует значимость системы человеческого капитала в экономическом развитии: ликвидация отставания уровня экономических благ от уровня экономических потребностей становится возможна только при использовании интеллектуальной собственности.

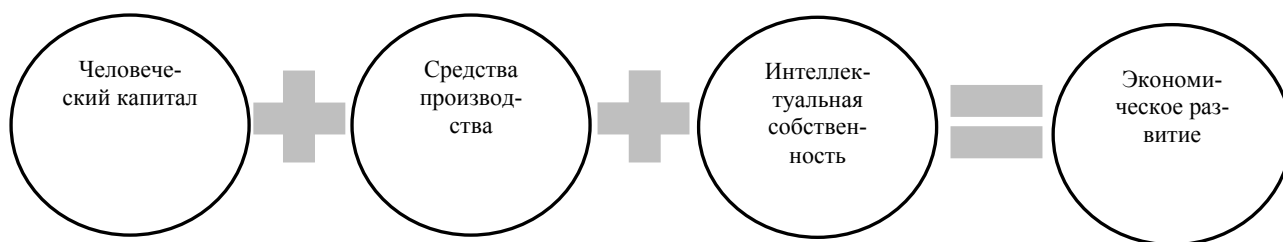


Рис. 1. Система отношений человеческого капитала

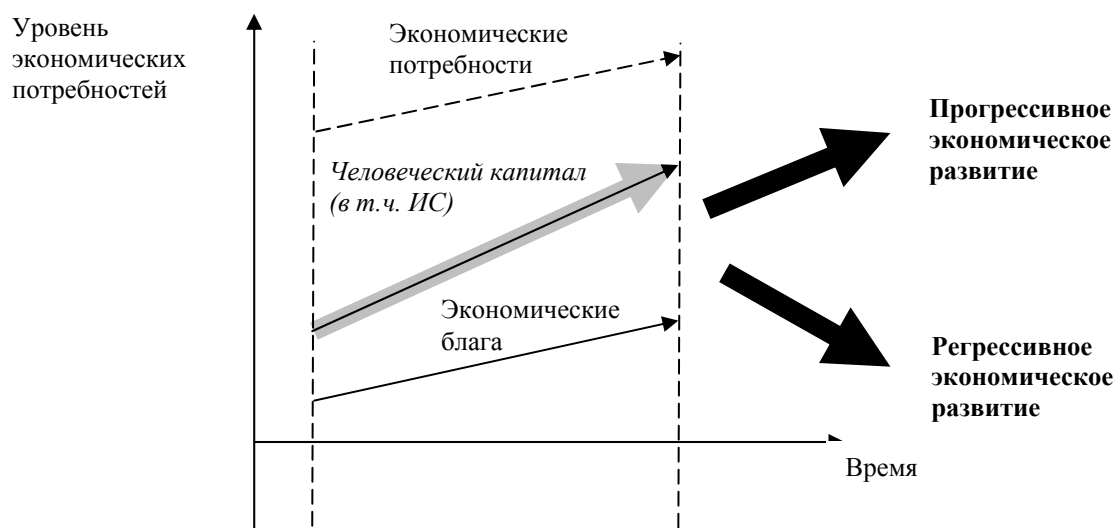


Рис. 2. Роль человеческого капитала в экономическом развитии

Человеческий капитал является стратегическим фактором развития аэрокосмической промышленности. Активизация и развитие интеллектуальной собственности в отношении человеческого капитала предприятий аэрокосмической отрасли должна стать приоритетной задачей менеджмента. Однако стоит отметить, что данный процесс требует смену взглядов на содержание научной категории «предприятие». Так А. Алчян и Г. Демсец предлагают понимать под предприятием (фирмой) спонтанный институт, решающий проблему минимизации трансакционных издержек, институциональный способ сделать возможным «производство в команде», которое нельзя рассматривать как принудительную власть предпринимателя (административный контроль), а скорее как вид «добровольного обмена» [16]. Для управления системой человеческого капитала сегодня недостаточно мотивации, стимулирующей улучшение количественных показателей труда. В рамках приведенного определения фирмы требуется формирование системного управленческого подхода, состоящего из следующих элементов:

- гибкая организационная структура;
- демократический стиль управления (основанный на лидерстве и участии работников в управлении организацией);
- делегирование полномочий;
- мотивация, командообразование, управление конфликтами.

Практическое использование указанных инструментов имеет ряд сложностей, преодоление которых возможно при детальном анализе трудового коллектива и развитых управленческих компетенциях руководителя.

Заключение. Сегодня в условиях формирования экономики знаний широкое распространение получило отношение к работникам как к активу предприятия, появился термин «человеческий капитал». Однако в научной литературе до сих пор нет единого определения данной категории, отсутствует системное представление о сущности человеческого капитала.

В данной статье представлено определение человеческого капитала как системы экономических отношений, в которой происходит формирование, использование, управление и развитие человеческого потенциала.

Научная новизна заключается в определении интеллектуальной собственности как системообразующего компонента человеческого капитала, представляющего собой творческий подход к осуществлению трудовой функции (стоит отметить, что ранее данная категория определялась через результаты интеллектуальной деятельности). Наличие и эффективное управление интеллектуальной собственностью (в рамках управления человеческим капиталом) становится ключевым фактором конкурентоспособности инновационно ориентированных предприятий аэрокосмической отрасли. Развитие трудового коллектива в творческую команду способно не только нивелировать негативные факторы управления предприятиями аэрокосмической отрасли, но создать основу для инновационного развития.

Библиографические ссылки

1. Thurow L. Investment in Human Capital. Belmont : Wadsworth Publishing Company, 1970. P. 19.
2. Покидченко М. Г., Чаплыгина И. Г. История экономических учений. М. : Инфра-М, 2008. 271 с.
3. Капелюшников Р. И. Экономическая теория прав собственности (методология, основные понятия, круг проблем). М. : ИЭ АН СССР, 1990. 90 с.
4. Критский М. М. Человеческий капитал. Л. : Изд. Ленгоста, 1991. 17 с.
5. Симкина Л. Г. Человеческий капитал в инновационной экономике. СПб. : СПбГНЭА, 2000. 48 с.
6. Кулишова Р. С. Параметры человеческого капитала и модели управления // Труд и социальные отношения. 2003. № 2. С. 13–14.
7. Моисеев Р. С. К вопросу о теориях «человеческого» и «природного» капиталов // Экономика природопользования. 2006. № 1. С. 5–22.

8. Большая советская энциклопедия. М. : Советская энциклопедия, 1967. Т. 20. 428 с.
9. Хмелева Г. А., Хмелева Е. М. К разработке программы долгосрочного социально-экономического развития России. Проблемы перехода к инновационной экономике // Проблемы современной экономики. 2009. № 2 (30). С. 13–14.
10. Зенин И. А. Основы гражданского права России. М. : Высш. образование, 2009. 288 с.
11. Щенникова Л. В. Вещные права в гражданском праве России. М. : БЕК, 1996. 200 с.
12. Суханов Е. А. Российское гражданское право. Общая часть. Вещное право. Наследственное право. Интеллектуальные права. Личные неимущественные права. М. : Статут, 2011. 960 с.
13. Осипов Ю. М. Теория хозяйства. Начала высшей экономики Т. 2. М. : Изд. Моск. ун-та, 1997. 232 с.
14. Скобарев А. А. Двойственность и противоречия интеллектуальной собственности в развитой рыночной экономике // Молодой ученый. 2012. № 2. С. 139–144.
15. Батоврин В. К. Толковый словарь по системной и программной инженерии : монография. М. : ДМК Пресс, 2012. 280 с.
16. Alchian A. A., Demsetz H. Production, information costs, and economic organization // American Economic Review. 1972. № 6. p. 12–14.
6. Kulishova R. S. [The parameters of human capital and management model]. *Trud i sotsial'nye otnosheniya*. 2003, No. 2, P. 13–14 (In Russ.).
7. Moiseev R. S. [On the question of the theory of “human” and “natural” capital]. *Ekonomika prirodopol'zovaniya*. 2006, No. 1, P. 5–22 (In Russ.).
8. *Bol'shaya Sovetskaya entsiklopediya* [Great Soviet Encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1967, Vol. 20, 428 p.
9. Khmeleva G. A., Khmeleva E. M. [To develop a program of long-term socio-economic development of Russia. Problems of transition to an innovation economy]. *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2009, No. 2 (30), P. 13–14 (In Russ.).
10. Zenin I. A. *Osnovy grazhdanskogo prava Rossii* [Principles of Civil Law in Russia]. Moscow, Vysshee obrazovanie Publ., 2009, 288 p.
11. Shchennikova L. V. *Veshchnye prava v grazhdanskom prave Rossii* [Property rights in civil law of Russia]. Moscow, BEK Publ., 1996, 200 p.
12. Sukhanov E. A. *Rossiyskoe grazhdanskoe pravo. Obshchaya chast'. Veshchnoe pravo. Nasledstvennoe pravo. Intellektual'nye prava. Lichnye neimushchestvennye prava* [Russian civil law. The general part. Property Law. Inheritance law. Intellectual property rights. Moral rights]. Moscow, Statut Publ., 2011, 960 p.
13. Osipov Yu. M. *Teoriya khozyaystva. Nachala vysshey ekonomii* [The theory of the economy. The beginning of the highest savings]. Vol. 2. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta Publ., 1997, 232 p.
14. Skobarev A. A. [Duality and contradiction of intellectual property in a developed market economy]. *Molodoy uchenyi*. 2012, No. 2, P. 139–144 (In Russ.).
15. Batovrin V. K. *Tolkovyi slovar' po sistemnoy i programmnoy inzhenerii* [Dictionary of system and software engineering]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 280 p.
16. Alchian A. A., Demsetz H. Production, information costs, and economic organization. *American Economic Review*. 1972, No. 6, P. 12–14.

References

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИННОВАЦИЙ В ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

О. Е. Подвербных, Б. Д. Санданова*

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail sandanova@sibsau.ru

Переход к инновационному пути развития предприятий оборонно-промышленного комплекса предполагает широкое распространение инновационной деятельности. Ее роль в экономике – повышение качества хозяйства, улучшение его технологической и товарной структуры, сбыта и реализации продукции, товаров, услуг, а также форм организации и управления производством.

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) – это часть промышленного комплекса страны, специализирующаяся на научной разработке производства оборонной продукции и обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации и других силовых структур государства. Для предприятий ОПК инновационная деятельность является весьма актуальным средством адаптации экономики в соответствии с требованиями времени. Инновационная деятельность в современных условиях является одной из самых затратных для создания наиболее совершенных образцов техники на имеющемся уровне знаний, но имеющая далеко идущие перспективы как в области оснащения, так и в области продаж продукции.

При организации и управлении инновационными процессами, порождаемыми использованием достижений науки, первым шагом является формирование идеи. Идеи могут поступать из многочисленных и разнообразных источников.

Представлено исследование и классификация источников инноваций для предприятий оборонно-промышленного комплекса. С целью классификации источников разработана матрица, которая включает как внутренние и внешние, так и коллективные и индивидуальные источники идей.

Разработанная классификация источников инноваций позволяет эффективно управлять персоналом предприятия, в том числе их мотивацией, с целью дальнейшего поощрения определенных работников или (и) группы работников, способных вносить наибольший вклад в процесс генерирования новых идей.

Полученные результаты позволят руководству предприятий производить выбор стратегии инновационного развития с учетом доступности источников инноваций для предприятий. Обоснован выбор между стратегией технологического проталкивания и стратегией рыночного подтягивания.

Ключевые слова: инновационная деятельность, инновации, источники инноваций, оборонно-промышленный комплекс, стратегия инновационного развития.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 3, P. 792–796

CLASSIFICATION OF SOURCES OF INNOVATION IN THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX

O. E. Podverbnykh, B. D. Sandanova*

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: sandanova@sibsau.ru

The transition to innovative development of enterprises of the military-industrial complex suggests a wide distribution of innovation activity. Its role in the economy is improvement of management quality, its technological and commercial structure, marketing and sale of products, goods, services, forms of organization and production management.

The military-industrial complex (MIC) is a part of the industrial complex in the country specializing on research, development and manufacturing of defense products and components for the Russian Armed Forces and other security agencies of the state. Innovative activity for the enterprises of defense industry is an important means of adaptation of economy in accordance with requirements of the time. Innovative activity in modern conditions is the most costly for the development of the perfect models of equipment on the existing level of knowledge, but with far-reaching possibilities in field equipment and in product sales.

The first step in organization and management of innovation processes generating the use of science is the formation of ideas. Ideas can come from many different sources.

The article is devoted to the study and classification of sources of innovation for enterprises of military-industrial complex. For classification of sources a matrix that includes both internal and external, and collective and individual sources of ideas has been developed.

The classification of sources of innovation can effectively help to manage the company staff, including motivation of employees to further promotion of certain employees or groups of employees who are able to make the greatest contribution to the process of generating new ideas.

The results will allow company managers to make a choice of strategy of innovative development of enterprises based on the availability of sources of innovation for companies. In the article the reasons of the choice between strategy technology push and market pull are given.

Keywords: innovative activity, innovation, sources of innovation, the military-industrial complex, innovative development strategy.

Введение. Тенденции развития российской промышленности выдвигают на передний план необходимость выработки эффективных механизмов функционирования предприятий оборонно-промышленного комплекса. В основе решения этой проблемы первоочередным является развитие высоких технологий в наукоемких отраслях на основе использования результатов инновационной деятельности. Инновационная деятельность – деятельность, направленная на обеспечение нового уровня взаимодействия факторов производства благодаря использованию новых научно-технических знаний. Основу инновационной деятельности составляет разработка и эффективное использование инновационных товаров и услуг. Инновационная деятельность позволяет повысить степень интенсификации производства, производительность труда, получить дополнительную прибыль во всех звеньях и отраслях ОПК [1; 2].

Матрица источников инноваций. Первым этапом инновационной деятельности предприятий является формулирование идеи. К идее можно прийти самостоятельно, перерабатывая информацию из разных источников, или в ходе целенаправленного творческого поиска, но можно заимствовать уже готовую идею и дать ей новую жизнь в рамках собственного предприятия.

Идеи новых товаров и услуг могут поступать из многочисленных и разнообразных источников. Источники идей могут быть как внутренними или внешними, так и коллективными или индивидуальными. С целью классификации этих источников разработана матрица, представленная на рис. 1.

В первом квадранте матрицы объединены источники инноваций, в основу которых положены результаты взаимодействия предприятий ОПК с внешним окружением. Предприятия оборонно-промышленного комплекса являются многопрофильными, и их деятельность направлена на создание:

- 1) технологий для разработки и производства военной продукции в интересах Министерства обороны РФ и других силовых структур;
- 2) продукции военного назначения для Вооруженных Сил РФ, других войск, воинских формирований и органов;
- 3) продукции военного назначения на экспорт;
- 4) гражданской продукции [3; 4].

Таким образом, при поиске новых идей руководители предприятий ОПК уделяют большое внимание мнению государственных заказчиков, поскольку конечной целью производства военной продукции является выполнение государственного оборонного заказа.

Окружение	Внешнее	III квадрант Выставки, конференции, семинары	I квадрант Государственные заказчики, партнеры, конкуренты
	Внутреннее	IV квадрант Изобретатели, рационализаторы	II квадрант Инновационные команды, НИОКР
		Индивидуальное	Коллективное

Участие в процессе генерирования идей

Рис. 1. Матрица источников инноваций

Большое значение для принятия управленческих решений в процессе инновационной деятельности придается информации о конкурентах. Действия конкурентов могут служить источниками новых идей, которые могут быть заимствованы и приспособлены для лучшего удовлетворения запросов потребителей. Том Питерс называет это «творческим заимствованием» [5]. Предприниматель должен очень внимательно изучать товары и услуги, предлагаемые другими компаниями. В результате нередко выясняется, что тот или иной товар либо услугу можно улучшить, и эта идея кладется в основу разработки собственной инновации. В силу высокой наукоемкости и технологичности производимой продукции предприятиями ОПК применение «обратного инжиниринга» представляется затратным. Однако этот подход может быть особенно полезен для понимания отдельных используемых технологий.

Одним из важных источников информации о конкурентах являются базы патентной документации. В данном случае конкуренты проявляют себя в том, что осуществляют правовую охрану изобретений и промышленных образцов, связанных с усовершенствованием продукции. Специфика деятельности оборонных предприятий, связанная с работой в особых условиях секретности, усложняет доступ к материалам других предприятий. Поэтому результатом проведенных исследований является обзорная информация о том, над какими проблемами работают предприятия-конкуренты и какие решения могут быть использованы для разработки собственных инноваций.

Бенчмаркинг – это механизм сравнительного анализа эффективности работы одной компании с показателями других, более успешных, компаний, не зависимо от их размера, сферы бизнеса и географического положения [6; 7]. Бенчмаркинг позволяет понять, как работают передовые компании ОПК, например транснациональные компании, и добиться таких же высоких результатов. Чаще всего данный механизм используется для изучения и последующего использования организационных инноваций при производстве гражданской продукции.

Важным источником инноваций является систематическое изучение законодательства и нормативных документов. При этом ставится задача избежать разработки продуктов, которые будут нарушать государственные законы и постановления, и определять потребности, возникающие в связи с появлением нового законодательства и подзаконных актов.

Предприятия ОПК, как правило, не располагают достаточными финансовыми ресурсами для проведения полномасштабных рыночных исследований, поэтому они редко используют источники инноваций, расположенные в данном квадранте, при организации инновационной деятельности.

Во втором квадранте матрицы (рис. 1) расположены источники инноваций, которые характеризуют процесс создания инноваций как запланированный предприятием. Источником новых идей является собственная научно-исследовательская и опытно-конструкторская деятельность предприятий. Это означает, что процесс создания инновации осуществляется поэтапно с подведением итогов в конце каждого этапа и позволяет руководителям формально оценить достигнутые результаты и принять решение о допол-

нительных инвестициях или о прекращении проекта. В данном случае влияние внешних источников сведено к минимуму.

Инновационная деятельность на предприятиях осуществляется в собственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских отделах. Соответствующие подразделения, как правило, хорошо оснащены и потому имеют большие возможности для поиска путей совершенствования продукции. В состав многих организаций входят специальные отделы НИОКР, чья обязанность – проектировать и разрабатывать новые продукты. Работа этих подразделений обычно связана с созданием и применением новой продукции и технологий. В некоторых высокотехнологичных отраслях затраты на НИОКР составляют значительную долю общих затрат [8–11].

К третьему квадранту отнесены источники инноваций, определяющие роль взаимодействия работников предприятий с внешними партнерами посредством участия в конференциях и посещения торговых выставок и т. д. Наиболее важной здесь представляется необходимость создания определенными людьми обширных сетей связи посредством командировок на другие предприятия, участия в конференциях и посещения торговых выставок.

Работники, непосредственно контактирующие с заказчиками, работниками предприятий-партнеров, исследователями в соответствующей области, нередко выдвигают идеи новой продукции и технологий, более конкурентоспособных на рынке. Для предприятий ОПК данный способ получения необходимой для генерирования новых идей информации о внешнем окружении является наиболее полезным для развития гражданской или конверсионной продукции.

К четвертому квадранту отнесены подходы, характеризующиеся опорой на индивидуальные способности работников предприятий ОПК в процессе создания инноваций. Главным условием успеха инновационной деятельности предприятий ОПК является наличие изобретателей и рационализаторов, захваченных разработкой и внедрением новых идей.

При эффективном управлении работники, как носители специфических знаний и навыков, становятся важнейшим источником инновационных идей и разработок на предприятии при условии соответствующей мотивации (вознаграждения, поощрения). Общий подход к организации управления инновационными предложениями работников предприятий ОПК представлен на рис. 2.

По источникам инновационных предложений определены три группы: инженерно-технические работники, специалисты и рабочие. Квалифицированные инженерно-технические работники способны быть генераторами идей, рациональных предложений, связанных с улучшением технических характеристик выпускаемой продукции, а также организацией производственно-технологического процесса в целом.

Специалисты и служащие предприятий участвуют в качестве источников инновационных предложений, связанных с выполнением своих функциональных обязанностей. Они могут выступить с предложениями на любом этапе инновационного процесса, так как проводят мониторинг и оценку состояния на каждом этапе.

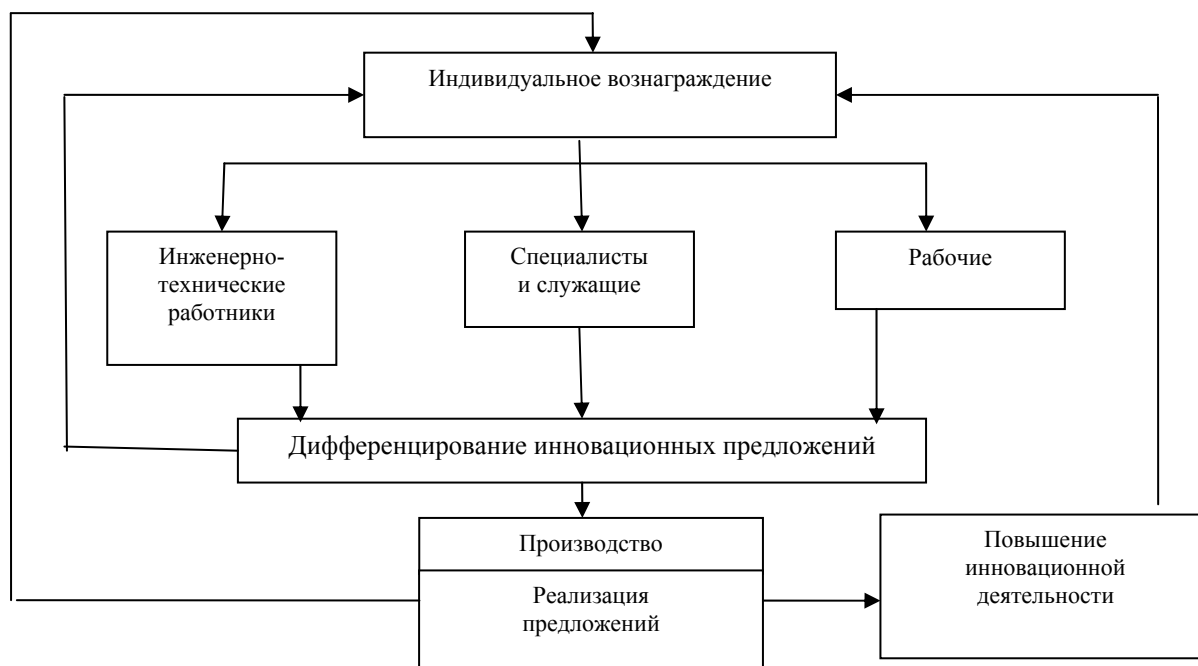


Рис. 2. Роль вознаграждения в управлении инновационными предложениями работников

Рабочие предприятий участвуют в инновационной деятельности, представляя рационализаторские предложения по совершенствованию узлов, агрегатов и т. д., связанных с выпуском новых образцов или модернизацией элементов конструкций и систем оборонной продукции.

Схема дифференцирования представляет собой своеобразный фильтр поступающих от работников инновационных идей, который обеспечивает отбор предложений, соответствующих, с одной стороны, стратегии предприятий, с другой стороны, имеющимся ресурсам, необходимым для их реализации. В качестве важнейшего элемента системы управления инновационной деятельностью следует рассматривать приемлемые мотивационные процессы, направленные на развитие их потенциала. При этом сила мотивационного воздействия на каждого работника зависит от жизнеспособности и реализуемости его инновационной идеи.

Разработанная классификация источников инноваций позволяет эффективно управлять мотивацией персонала, в том числе выделять с целью дальнейшего поощрения определенных работников или (и) группы работников, способных вносить наибольший вклад в процесс генерирования новых идей.

Стратегии инновационного развития. В зависимости от того, к какому квадранту матрицы принадлежит источник инновации, производится выбор стратегии инновационной деятельности предприятия ОПК. Выбор, как правило, происходит между стратегией технологического проталкивания и стратегией рыночного подтягивания.

В том случае, если источники инноваций являются «внутренними», то предприятиями применяются стратегии технологического проталкивания. Эта стратегия может приводить к созданию новой продукции или технологии на рынке гражданской и конверсион-

ной продукции, потребность в которых не осознается самими потребителями (квадранты 2 и 4). Использование технологического проталкивания может помочь предприятиям завоевать технологическое лидерство и связанные с ним конкурентные преимущества [12–15].

Если источники инноваций – «внешние», то используется стратегия рыночного подтягивания. Данная стратегия включает определение запросов государственных заказчиков, исследование деятельности конкурентов, изучение законодательства, нормативных документов и т. д. (квадранты 1 и 3). Использование рыночного подтягивания обычно тесно связано с оценкой существующего положения на рынке и дает определенные гарантии того, что на разработку и реализацию новой продукции и технологии будут выделены средства из бюджета либо будут привлечены средства инвесторов.

Заключение. Практическое применение разработанной классификации источников инноваций в процессе управления инновационной деятельностью позволяет рационально использовать стратегии технологического проталкивания и рыночного подтягивания, совместное применение которых повышает эффективность внедрения новых идей, которые способны создавать предприятия оборонно-промышленного комплекса.

Библиографические ссылки

1. Кокурин Д. И. Инновационная деятельность. М. : Экзамен, 2001. 575 с.
2. Кузнецов В. П., Андрияшина Н. С. Основные тенденции развития инновационной деятельности в машиностроении // Вестник Чувашского университета. 2013. № 1. С. 278–285.
3. Причины и источники инновационных идей [Электронный ресурс]. URL: <http://econbooks.ru/books/part/2462> (дата обращения: 16.03.2015).

4. Далёкин П. И., Глебова О. В., Гусева И. Б. Состояние и перспективы развития оборонно-промышленного комплекса Нижегородской области [Электронный ресурс] // Наука-Rastudent.ru. 2014. № 2. URL: <http://nauka-rastudent.ru/2/1216/> (дата обращения: 16.03.2015).
5. Питерс Т. В поисках совершенства: уроки самых успешных компаний Америки. М. : Вильямс, 2005. 560 с.
6. Каленская Н. В. Маркетинг инноваций. Казань: Казанский федеральный университет, 2012. 186 с.
7. Дилтс Р. Стратегии гениев. М. : Класс, 1999. 272 с.
8. Парахина В. Н., Борис О. А. Взаимосвязь менеджмента промышленной компании с проблемами и источниками инноваций // Социально-экономические явления и процессы. 2012. № 3. С. 74–76.
9. Как предприятию собирать и оценивать инновационные идеи сотрудников [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tekora.ru/Products/44i/prensa/kak-sobirat-idei/> (дата обращения: 16.03.2015).
10. Мюллер Р. У. Сущность и классификация инноваций // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. С. 244–248.
11. Мерзляков В. Ф. Инновации как элемент экономического развития // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 2 (2). С. 209–213.
12. Субъекты инновационного процесса и их функции [Электронный ресурс]. URL: <http://www.irbis.vogu.ru/repos/11391/Html/30.htm> (дата обращения: 16.03.2015).
13. Веселков А. В. Человеческий капитал в качестве источника социальных инноваций // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2013. Т. 6, № 1. С. 251–258.
14. Лутовинов П. П., Осташевский С. М. Управление инновационной деятельностью на промышленном предприятии // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Экономика и менеджмент». 2013. Т. 7, № 4. С. 56–59.
15. Соколов К. О. Инновации в АПК: классификация источников // Вестник ОГУ. 2012. № 8 (144). С. 76–79.
3. *Prichiny i istochniki innovatsionnykh idey* [Reasons and sources of innovative ideas]. (In Russ.). Available at: <http://econbooks.ru/books/part/2462> (accessed 16.03.2015).
4. Dalekin P. I., Glebova O. V., Guseva I. B. [The state and prospects of development of the military-industrial complex of Nizhniy Novgorod region]. *Nauka-Rastudent.ru*. 2014, No. 2 (In Russ.). Available at: <http://nauka-rastudent.ru/2/1216/> (accessed 16.03.2015).
5. Piteris T. *V poiskakh sovershenstva: uroki samykh uspekhnykh kompaniy Ameriki* [In search of excellence: Lessons from Americas best run companies]. Moscow, Williams Publ., 2005, 560 p.
6. Merzlyakov V. F. [Innovations as element of economic development]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*. 2012, No. 2 (2), P. 209–213 (In Russ.).
7. Diltis R. *Strategii geniev* [Strategies of genius]. Moscow, Independent company Class Publ., 1999, 272 p.
8. Parakhina V. N., Boris O. A. [Relationship management of industrial companies with problems and sources of innovation]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy*. 2012, No. 3, P. 74–76 (In Russ.).
9. *Kak predpriyatiyu sobirat' i otsenivat' innovatsionnye idei sotrudnikov* [How the enterprise to collect and estimate innovative ideas of employees] (In Russ.). Available at: <http://www.tekora.ru/Products/44i/prensa/kak-sobirat-idei/> (accessed 16.03.2015).
10. Myuller R. U. [Essence and classification of innovations]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012, No. 6, P. 244–248 (In Russ.).
11. Kalenskaya N. V. *Marketing innovatsiy* [Marketing of innovations]. Kazan, Kazan federal university Publ., 2012, 186 p.
12. *Sub'ekty innovatsionnogo protsessa i ikh funktsii* [The subjects of the innovation process and their functions]. (In Russ.). Available at: <http://www.irbis.vogu.ru/repos/11391/Html/30.htm> (accessed 16.03.2015).
13. Veselkov A. V. [Human capital as a source of social innovation]. *Interespo GEO-Sibir'*. 2013, Vol. 6, No. 1, P. 251–258 (In Russ.).
14. Lutovinov P. P., Ostashevskiy S. M. [Management of innovative activity at the industrial enterprise]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Ekonomika i menedzhment"*. 2013, Vol. 7, No. 4, P. 56–59 (In Russ.).
15. Sokolov K. O. [Innovations in agroindustrial complex: classification of sources]. *Vestnik OGU*. 2012, No. 8 (144), P. 76–79 (In Russ.).

References

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Автономов Николай Николаевич – доцент кафедры компьютерного моделирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: avtnmv_nn@mail.ru.

Алешечкин Андрей Михайлович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных систем, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru.

Анискович Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра СО РАН. E-mail: plazal@mail.ru.

Аплеснин Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

Ашейчик Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: aseichik52@mail.ru.

Банникова Анастасия Владимировна – аспирант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: stasy144@yandex.ru.

Беляков Роман Андреевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: elroman1@yandex.ru.

Богданов Валерий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сварки летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sibniitm@yandex.ru.

Браништи Владислав Владимирович – старший преподаватель кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: branishti-v-v@yandex.ru.

Бусыгин Сергей Леонидович – старший преподаватель кафедры машиностроения, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: politex_1999@bk.ru.

Вайнштейн Исаак Иосифович – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: isvain@mail.ru.

Вайнштейн Юлия Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: julia_ww@mail.ru.

Веселков Сергей Александрович – директор обсерватории, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Горбатюк Елена Олеговна – студентка, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: lenysya-diamond@mail.ru.

Готовко Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет; доцент кафедры сварки летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: gefest_61@mail.ru.

Двирный Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный специалист по выявлению и защите интеллектуальной собственности, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: dvirnyi@mail.ru.

Двирный Гурий Валерьевич – кандидат технических наук, инженер по наладке и испытаниям, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: dg1802@mail.ru.

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент Военно-инженерного института, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: dmitriev121074@mail.ru.

Еременко Наталья Валерьевна – магистрант, Сибирский федеральный университет; переводчик, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: erko@iss-reshetnev.ru.

Ереско Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, член-корреспондент Академии наук Высшей школы Российской Федерации; профессор кафедры основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: eresko07@mail.ru.

Ереско Татьяна Трофимовна – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: erescott@mail.ru.

Еркаев Николай Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом № 7, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: nerkaev@gmail.com.

Ерошенко Павел Евгеньевич – студент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: vlaf@nm.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, первый проректор – проректор по образовательной деятельности, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Жуков Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com.

Заварзина Анастасия Викторовна – студентка, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: anastasia_34@bk.ru.

Зеленков Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент, проректор по информатизации и коммерциализации научных разработок – начальник научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Иванов Виктор Андреевич – аспирант кафедры прикладной механики, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: Vintextrim@yandex.ru.

Карпов Игорь Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Картушинский Алексей Васильевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геоинформационных систем, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет; старший научный сотрудник, Институт биофизики СО РАН. E-mail: kartalvas@rambler.ru.

Карцан Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Военного института, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Ковалева Евгения Андреевна – аспирант кафедры физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет; инженер, Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН. E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru.

Коломенцев Александр Иванович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры 202 «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт. E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Корнеева Анна Анатольевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных систем, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: stasy144@yandex.ru.

Краснов Павел Олегович – кандидат химических наук, доцент кафедры физики, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кудрин Олег Иванович – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии естественных наук; профессор кафедры 202 «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт.

Кузакова Нина Михайловна – студентка, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: djaga_86@mail.ru.

Кузубов Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН; доцент кафедры физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: alexxkuzubov@gmail.com.

Куклин Артем Валентинович – аспирант кафедры физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет; инженер, Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН. E-mail: artem.icm@gmail.com.

Кукоба Николай Андреевич – аспирант, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: ku-ru07@inbox.ru.

Кукушкин Евгений Владимирович – аспирант кафедры основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва.

Лепешев Анатолий Александрович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Мамдух Мохаммед Гомаа – аспирант кафедры информационных технологий и безопасности, Астраханский государственный университет. E-mail: doha_gomaa@yahoo.com.

Мангалова Екатерина Сергеевна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени М. Ф. Решетнёва. E-mail: e.s.mangalova@hotmail.com.

Меновщиков Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ конструирования машин, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: menovchikovva@mail.ru.

Михалев Юрий Глебович – доктор химических наук, профессор кафедры физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: y.mihalev@bk.ru.

Михалева Наталья Сергеевна – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com.

Михальченко Галина Ефимовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: mihal4enko.galina@yandex.ru.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: michla@mail.ru.

Николаева Кристина Максимовна – студентка, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: ya.krist-nickolaeva2012@yandex.ru.

Ощепкова Дарья Сергеевна – аспирант кафедры экономики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: daria_343@mail.ru.

Подвербных Ольга Ефимовна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой международного кадрового и проектного управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: podverbnih@sibsau.ru.

Полонский Владимир Львович – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: Vladimir.polonsky@gmail.com.

Попов Захар Иванович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва; научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского СО РАН. E-mail: zipcool@bk.ru.

Пронина Екатерина Алексеевна – аспирант, Красноярский государственный аграрный университет. E-mail: katyushka_2707@mail.ru

Раводина Дарья Владимировна – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Раева Олеся Владимировна – аспирант кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru.

Санданова Баира Дашинимаевна – аспирант кафедры международного кадрового и проектного управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sandanova@sibsau.ru.

Саунин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Сенашов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН; профессор кафедры алгебры и математической логики, Сибирский федеральный университет. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Середин Валентин Игоревич – аспирант, Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра СО РАН. E-mail: seredin@sdtb.krasn.ru.

Серенков Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент Военного института, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: servlad@list.ru.

Синицкий Дмитрий Евгеньевич – кандидат технических наук, инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: sderespect@gmail.com.

Соколов Михаил Михайлович – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: fintibober@bk.ru.

Телегин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Токмин Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии обработки материалов, Политехнический институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: tam550@yandex.ru.

Тололо Александр Вячеславович – заведующий лабораторией кафедры компьютерного моделирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: 8350474@gmail.com.

Ушаков Анатолий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: ushakov@mail.ru.

Федоров Леонид Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Федченко Дмитрий Александрович – инженер-конструктор 1-й категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: dfed4enko@mail.ru, сот.тел. 89504285998

Фельк Владимир Александрович – доцент кафедры физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: vlaf@nm.ru.

Феоктистов Денис Сергеевич – студент 5 курса кафедры инфокоммуникаций, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет; сотрудник АО «НПП «Радиосвязь». E-mail: feoktistov-d-s@mail.ru.

Финогенов Сергей Леонардович – старший научный сотрудник кафедры 202 «Ракетные двигатели», Московский авиационный институт. E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Харьков Антон Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: khark.anton@mail.ru.

Хоменко Игорь Иванович – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com.

Чесноков Егор Яковлевич – старший лаборант кафедры технической физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: egor.chesnokov.93@mail.ru.

Шайдуров Владимир Викторович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт вычислительного моделирования СО РАН; профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: shaidurov04@mail.ru.

Шайхудинов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Шаляпин Андрей Анатольевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: shaaa.sibsau@mail.ru.

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Шестернева Олеся Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: kuznetcova_o@mail.ru.

Шлепкин Алексей Анатольевич – доцент, Сибирский федеральный университет. E-mail: ak_kgau@mail.ru.

Шумакова Наталия Анатольевна – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой делового иностранного языка, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: shumna@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleshechkin Andrey Mikhaylovich – Dr. Sc., Docent, Professor, Radioelectronic systems Dept., Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru.

Aniscovich Evgeniy Valerievich – Cand. Sc., scientist, Special Design and Technological Bureau “Nauka”, Krasnoyarsk Scientific Centre of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: plaza1@mail.ru.

Aplesnin Sergey Stepanovich – Dr. Sc., Professor, Head of Physics Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: aplesnin@sibsau.ru

Asheichik Anatoliy Anatol'evich – Cand. Sc., Docent, St. Petersburg Polytechnical University Peter the Great. E-mail: aseichik52@mail.ru.

Avtonomov Nikolay Nikolaevich – Docent, Computer Modeling sub-faculty, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: avtnmv_nn@mail.ru.

Bannikova Anastasia Vladimirovna – postgraduate student, Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technology. E-mail: stasy144@yandex.ru.

Belyakov Roman Andreevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: elroman1@yandex.ru.

Bogdanov Valery Vasilievich – Cand. Sc., Docent, Head of Welding of Aircraft Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sibniitm@yandex.ru.

Branishti Vladislav Vladimirovich – senior lecturer, Higher mathematics Dept, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: branishti-v-v@yandex.ru.

Busygin Sergey Leonidovich – senior lecturer, Mechanical Dept., Siberian Federal University, Polytechnic Institute. E-mail: politex_1999@bk.ru.

Chesnokov Egor Yakovlevich – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: egor.chesnokov.93@mail.ru.

Dmitriev Dmitry Dmitrievich – Cand. Sc., Docent, Military Engineering Institute, Siberian Federal University. E-mail: dmitriev121074@mail.ru.

Dvirnyi Guryi Valeryevich – Cand. Sc., JSC “Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: dg1802@mail.ru.

Dvirnyi Valeryi Vasilyevich – Dr. Sc., Professor. JSC “Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Eremenko Natalya Valeryevna – Master's student, Siberian Federal University, JSC “Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: erko@iss-reshetnev.ru.

Eresko Sergei Pavlovich – Dr. Sc., Professor, Honored inventor of the Russian Federation, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: eresko07@mail.ru.

Eresko Tatiana Trofimovna – Dr. Sc., Professor, Head of Foundations of machine design Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: erescott@mail.ru.

Erkaev Nikolai Vasilevich – Dr. Sc., Professor, Head of Dept., Institute of Computational Modeling, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: nerkaev@gmail.com.

Eroshenko Pavel Evgen'evich – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: vlaf@nm.ru.

Erygin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc., professor, the first vice rector, the vice rector on educational activity, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Fedchenko Dmitry Alexandrovich – 1st category design engineer, JSC “Reshetnev Information Satellite Systems”. E-mail: dfed4enko@mail.ru.

Fedorov Leonid Yur'evich – graduate student, junior researcher, Siberian Federal University. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Fel'k Vladimir Aleksandrovich – Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: vlaf@nm.ru.

Feoktistov Denis Sergeevich – fifth-year student, Dept. of Infocommunication, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University; employee of “Radiosvyaz”. E-mail: feoktistov-d-s@mail.ru.

Finogenov Sergei Leonardovich – Senior Researcher, Dept. 202 “Rocket Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Gorbatuk Elena Olegovna – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: lenysya-diamond@mail.ru.

Gotovko Sergey Alekseevich – Cand. Sc., Docent, Mechanical Dept., Siberian Federal University, Polytechnic Institute; Docent, Welding of Aircraft Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: gefest_61@mail.ru.

Ivanov Viktor Andreevich – postgraduate student, Applied mechanics Dept., Siberian Federal University, Polytechnic Institute. E-mail: Vintextrim@yandex.ru.

Karpov Igor Vasil'evich – Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Kartsan Igor' Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Head of Military Institute, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Kartushinsky Aleksey Vasil'evich – Cand. Sc., Docent, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University; senior researcher, Institute of Biophysics RAS. E-mail: kartalvas@rambler.ru.

Kharkov Anton Mikhailovich – Cand. Sc., Senior lecturer, Physics Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: khark.anton@mail.ru.

Khomenko Igor Ivanovich – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com.

Kolomentsev Alexander Ivanovich – Cand. Sc., Professor, Dept. 202 “Rocket Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: sfmai2015@mail.ru.

Korneeva Anna Anatol'yevna – Cand. Sc., senior lecturer, Information Systems Dept., Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies. E-mail: stasy144@yandex.py

Kovaleva Evgeniya Andreevna – postgraduate student, Siberian Federal University; engineer at Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru.

Krasnov Pavel Olegovich – Cand. Sc., Docent, Siberian State Technological University. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor, Chief research officer, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kudrin Oleg Ivanovich – Dr. Sc., Professor, Academician, Russian Academy of Natural Sciences; Professor of Dept. 202 “Rocket Engines”, Moscow Aviation Institute (National Research University).

Kuklin Artem Valentinovich – postgraduate student, Siberian Federal University; engineer at Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: artem.icm@gmail.com.

Kukoba Nikolay Andreevich – postgraduate student, Institute of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: ku-ru07@inbox.ru.

Kukushkin Evgeniy Vladimirovich – postgraduate student, Basics of machine design Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Kuzakova Nina Mihailovna – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: djaga_86@mail.ru.

Kuzubov Aleksandr Aleksandrovich – Cand. Sc., senior researcher at Kirensky Institute of Physics SB RAS; Docent, Siberian Federal University. E-mail: alexxkuzubov@gmail.com.

Lepeshev Anatoly Aleksandrovich – Dr. Sc., Lead researcher, Siberian Federal University. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Mamdouh Mohammed Gomaa – postgraduate student, Information Technologies and Security Dept., Astrakhan State University. E-mail: doha_gomaa@yahoo.com.

Mangalova Ekaterina Sergeevna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: e.s.mangalova@hotmail.com.

Mihalchenko Galina Efimovna – Cand. Sc., Docent, Dept. of Applied Mathematics and Computer Security, Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University. E-mail: mihal4enko.galina@yandex.ru.

Miheev Anatolii Egorovich – Dr. Sc., Professor, Head of Flying Vehicles Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: michla@mail.ru.

Mikhalev Yuriy Glebovich – Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University. E-mail: y.mihalev@bk.ru.

Mikhaleva Natal'ya Sergeevna – Cand. Sc., researcher, Siberian Federal University. E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com.

Menovchikov Vladimir Alexandrovich – Dr. Sc., Professor, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics, Fundamentals of machine design Dept. E-mail: menovchikovva@mail.sibsau.ru.

Nikolaeva Kristina Maksimovna – student, Siberian Federal University. E-mail: ya.krist-nickolaeva2012@yandex.ru.

Oshchepkova Daria Sergeevna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: daria_343@mail.ru.

Podverbnykh Olga Efimovna – Dr. Sc., Head of International personnel and project management department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: podverbni@h@sibsau.ru.

Polonsky Vladimir L'vovich – Cand. Sc., Docent, St. Petersburg Polytechnical University Peter the Great. E-mail: Vladimir.polonsky@gmail.com.

Popov Zakhar Ivanovich – Cand. Sc., Reshetnev Siberian State Aerospace University; researcher at Kirensky Institute of Physics SB RAS. E-mail: zipcool@bk.ru.

Pronina Ekaterina Alekseevna – postgraduate student, Krasnoyarsk State Agrarian University. E-mail: katyushka_2707@mail.ru.

Raeva Olesya Vladimirovna – postgraduate student, Electronic engineering and telecommunications Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: O.V.Raeva@yandex.ru.

Ravodina Daria Vladimirovna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Safonov Konstantin Vladimirovich – Dr. Sc., Professor, Head Dept. of Applied Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Sandanova Baira Dashinimaevna – postgraduate student, Department of International personnel and project management, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sandanova@sibsau.ru.

Saunin Viktor Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, Senior Researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Senashov Vladimir Ivanovich – Dr. Sc., Professor, leading researcher, Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS; Professor, Siberian Federal University. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Seredin Valentin Igorevich – postgraduate student, Special Design and Technological Bureau “Nauka”, Krasnoyarsk Scientific Centre of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: seredinv@sdtb.krasn.ru.

Serenkov Vladimir Ivanovich – Cand. Sc., Docent, Military Institute, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: servlad@list.ru.

Shalyapin Andrey Anatol'evich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: shaaa.sibsau@mail.ru

Shaydurov Vladimir Viktorovich – Corresponding member of Russian Academy of Sciences; Dr. Sc., Professor, Director of Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: shaidurov04@mail.ru.

Shayhadinov Aleksandr Anatol'evich – Cand. Sc., Senior Researcher, Siberian Federal University. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Shestakov Ivan Yakovlevich – Dr. Sc, Docent, professor, Electronic engineering and telecommunications Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Shesterneva Olesya Viktorovna – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kuznetcova_o@mail.ru.

Shlepkin Alexey Anatolievich – Docent, Siberian Federal University. E-mail: ak_kgau@mail.ru.

Shumakova Nataliya Anatol'evna – Cand. Sc., Docent, Head of Business foreign language Dept, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: shumna@inbox.ru.

Sinitskiy Dmitry Evgen'evich – Cand. Sc., engineer-designer, JSC “Reshetnev Information Satellite System”. E-mail: sderespect@gmail.com.

Sokolov Mikhail Mikhaylovich – Master's student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: fintibober@bk.ru

Telegin Sergey Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Tokmin Alexander Mikhailovich – Cand. Sc., Docent, Materials science and technology materials processing Dept., Siberian Federal University, Polytechnic Institute. E-mail: tam550@yandex.ru.

Tololo Aleksandr Vyacheslavovich – Computer Modeling sub-faculty Laboratory Head, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: avtnmv_nn@mail.ru.

Ushakov Anatoly Vasil'evich – Cand. Sc., Docent, Senior Researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ushakov@mail.ru.

Vainshtein Isaak Iosifovich – Cand. Sc., Professor, Dept. of Applied Mathematics and Computer Security, Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University. E-mail: isvain@mail.ru.

Vainshtein Yuliya Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Dept. of Applied Mathematics and Computer Security, Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University. E-mail: julia_ww@mail.ru.

Veselkov Sergej Aleksandrovich – Director of Observatory, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: pulsar1963@yandex.ru.

Zavarzina Anastasia Viktorovna – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: anastasia_34@bk.ru.

Zelenkov Pavel Viktorovich – Cand. Sc., Docent, Vice-Rector for IKNR, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Zhukov Vadim Gennad'evich – Cand. Sc., Docent, Information technologies security Dept., Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com.