ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Том 16, № 2

Красноярск 2015

ВЕСТНИК

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

Том 16, № 2

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
Лаптенок 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)
Краточвилова 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)

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2015

VESTNIK

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

Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems

Vol. 16, No 2

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)

© Reshetnev Siberian State Aerospace University, 2015

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

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 academika 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 been 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

Редактор: О. А. Плехова
Редактор английского текста С. Г. Эфа
Оригинал-макет и верстка О. В. Булатниковой
Подписано в печать 25.05.2015. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 29,6.
Уч.-изд. л. 37,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/231. С 118/15.
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: 14.07.2015. Свободная цена

Editor O. A. Plekhova
Editor (*English Language*) S. G. Efa
Layout original O. V. Bulatnikova
Signed (for printing): 25.05.2015. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 29,6. Published sheets 37,0.
1000 copies. Order 87/231. C 118/15.
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: 14.07.2015. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Алешечкин А. М., Тронин О. А. Повышение точности определения радионавигационных параметров для систем дальней радионавигации 292
Денисов В. П., Дубинин Д. В., Кочегуров А. И., Лаевский В. Е. (Geringer V.) Результаты исследования комплексного метода оценки качества оконтуривания на основе двухмерного точечного потока восстановления 300
Зыкова Т. В. Об интегральном представлении типа Меллина–Барнса решения системы полиномиальных уравнений специального вида 310
Казаковцев Л. А., Антамошкин А. Н. Метод жадных эвристик для задач размещения 317
Кузнецов П. А. К вопросу анализа эффективности систем с полным резервированием 326
Латушкина Л. Л. Оценка динамической устойчивости простейшей электроэнергетической системы в объектно ориентированной среде программирования Delphi 331
Михов Е. Д. Оптимизация коэффициента размытости ядра в непараметрическом моделировании 338
Сенашов С. И., Филюшина Е. В., Гомонова О. В. Построение упруго-пластических границ с помощью законов сохранения 343
Сидорова Т. В., Зыкова Т. В., Сафонов К. В. О модификации быстрого одномерного преобразования Фурье по алгоритму Кули–Тьюки 360
Тестоедов Н. А., Двирный В. В., Крушенко Г. Г., Двирный Г. В. Возможности построения радиосвязи с помощью орбитальных отражателей и магнитных антенн вращающейся поляризации 364
Чжан Е. А. К проблеме генерации выборки при идентификации безынерционных процессов 368

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Ахметжанов Р. В., Богатый А. В., Дронов П. А., Дьяконов Г. А., Иванов А. В. Высокочастотный ионный двигатель малой мощности 378
Барабанов С. А., Бирюков В. И. Затухание вынужденных колебаний и гидроударных волн в турбулентном потоке протяжённых трактов систем питания жидкостных ракетных двигателей 386
Дорофеев М. О. Методика определения пространственного положения недеформируемой конструкции космического аппарата 395
Ермаков Д. В. Электродвигатель-маховик с магнитогидравлическими опорами вращения 400
Ермошкин Ю. М., Кочев Ю. В., Трофимчук Д. А., Якимов Е. Н. Проблема электростатических разрядов в электрореактивной двигательной подсистеме геостационарного космического аппарата 404
Ключников А. В. Развитие и совершенствование алгоритма одноплоскостной балансировки в динамическом режиме высокоскоростной летающей модели 411
Крылов Ю. В., Тайгин В. Б. Проектирование облучателя в *Ka*/*Q*-диапазоне на основе «восстанавливающей» схемы 417
Лихачев М. В. Методика нисходящего проектирования космического аппарата 423
Тестоедов Н. А., Двирный В. В., Морозов Е. А., Двирный Г. В., Еременко Н. В. Повышение долговечности приборов космических аппаратов 430
Турчинович А. О. Моделирование химического взаимодействия продуктов сгорания с воздухом за срезом сопел двигателей самолета 438

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Куклин А. В., Кузубов А. А., Денисов В. М., Ковалева Е. А., Шостак С. А. Квантово-химическое исследование структуры и свойств моно- и бислоев CrN 450
Михалева Н. С., Кузубов А. А., Попов З. И., Еремина А. Д., Высотин М. А. Теоретическое исследование внедрения атомов лития в кремний 456
Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Раводина Д. В. Разработка функциональной схемы влияния основных факторов процесса микродугового оксидирования на свойства покрытий 464
Пискажова Т. В., Сидельников С. Б., Белолипецкий В. М., Якивьюк П. Н., Сидельников А. С. «Виртуальный СЛИПП» – математическая модель для управления агрегатом СЛИПП и её визуализация с помощью программных продуктов WinCC 7.0 и Step 7 470
Романова О. Б., Харьков А. М., Ситников М. Н., Кретинин В. В. Переход металл–диэлектрик в катион-замещенных соединениях $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) 478

Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., Шайхадинов А. А., Федоров Л. Ю.
Метод получения нанодисперсных материалов в плазме импульсного дугового разряда низкого давления 485
Федоров Л. Ю., Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., Шайхадинов А. А.
Исследование формирования карбидов в плазме дугового разряда низкого давления 491

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Белякова Е. В. Оценка логистического потенциала предприятия ракетно-космической отрасли на основе индикаторного метода 498
Еремеева С. В. Выбор инструментов управления развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности 503
Онисифорова Е. В. Система управления инновационным потенциалом персонала на наукоемком предприятии 509
Сумина Е. В., Зябликов Д. В. Инновационное развитие региона: потребности диверсифицированного роста экономики Сибири в условиях реиндустриализации 515
Товстоношенко В. Н Риски инновационной деятельности ракетно-космической промышленности 523

Сведения об авторах 530

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Aleshechkin A. M., Tronin O. A. Accuracy increase of determining navigation parameters for long-range radionavigation systems 292
Denisov V. P., Dubinin D. V., Kochegurov A. I., Laevski V. E. (Geringer V.) The results of the investigation of the integrated performance evaluation method of edge detection based on the two-dimensional renewal stream 300
Zykova T. V. About integrated representation like Mellina–Barnsa of the solution of system of the polynomial equations of the special kind 310
Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N. Greedy heuristic method for location problems 317
Kuznetsov P. A. On the analysis of the effectiveness of fully redundant systems 326
Latushkina L. L. Assessment of dynamic stability of a simple power system in an object-oriented programming environment Delphi 331
Mihov E. D. Optimization of coefficient of blurring of the kernel in nonparametric modelling 338
Senashov S. I., Filyushina E. V., Gomonova O. V. Construction of elasto-plastic boundaries using conservation laws 343
Sidorova T. V., Zykova T. V., Safonov K. V. About modification of one-dimensional fast fourier transform on algorithm of Cooley–Tukey 360
Testoedov N. A., Dvirnyi V. V., Krushenko G. G., Dvirnyi G. V. The possibility of constructing a radio communication using orbital reflectors and magnetic antennas polarization rotating 364
Chzhan E. A. To the problem of generation sample in solving the problem of non interial processes identification 368

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Akhmetzhanov R. V., Bogatyi A. V., Dronov P. A., Dyakonov G. A., Ivanov A. V. Low-power radio-frequency ion thruster 378
Barabanov S. A., Biryukov V. I. Attenuation of the compelled fluctuations and hydroshock waves in the turbulent stream of extended paths of power supply systems of liquid rocket engines 386
Dorofeev M. O. Definitioning technique of spatial position of non-deforming construction of spacecraft 395
Ermakov D. V. Reaction wheels with magnetic-hydraulic bearings 400
Ermoshkin Y. M., Kochev Y. V., Trofimchuk D. A., Yakimov E. N. Electrostatic discharge problem in geostationary spacecraft electrojet propulsion subsystem 404
Klyuchnikov A. V. Developing and refining the algorithm of single-plane dynamic balancing of a high-speed flying prototype 411
Krylov Y. V., Taygin V. B. Design feed antenna *Ka*/*Q*-band based on “repairable” scheme 417
Lihachev M. V. Top-down approach for spacecraft development 423
Testoedov N. A., Dvirnyi V. V., Morozov E. A., Dvirnyi G. V., Eremenko N. V. Extending the life of satellite on-board units 430
Turchinovich A. O. Simulation of chemical interaction of combustion products with air behind the exit section of nozzles aircraft engine 438

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Kuklin A. V., Kuzubov A. A., Denisov V. M., Kovaleva E. A., Shostak S. A. Quantum chemical study of structure and properties of CrN mono- and bilayer 450
Mikhaleva N. S., Kuzubov A. A., Popov Z. I., Eremina A. D., Visotin M. A. Theoretical study of lithium atoms penetration into silicon 456
Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Ravodina D. V. Development of the functional diagram of influence of the basic factors of the MDO process on the properties of coatings 464
Piskazhova T. V., Sidelnikov S. B., Belolipetskii V. M., Yakivyuk P. N., Sidelnikov A. S. “Virtual CC&RP” – a mathematical model for the control of the unit CC&RP and its visualization with the help of software products WinCC 7.0 and Step 7 470
Romanova O. B., Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Kretinin V. V. Metal-insulator transition in the cation-substituted compounds $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) 478

Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Shaihadinov A. A., Fedorov L. Yu.
Technology ready use for producing nanomaterials in the plasma of a low-pressure pulsed arc discharge 485
Fedorov L. Yu., Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Shaihadinov A. A.
Study of carbide formation in the plasma of a low-pressure pulsed arc discharge 491

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

Belyakova E. V. Assessment of logistical potential of the enterprise of rocket-space industry
on the basis of indicator method 498
Eremeeva S. V. Selecting management tools development of innovative potential
of high technology enterprise of rocket and space industry 503
Onisiforova E. V. The system of management of personnel's innovative potential
at a high technology enterprise 509
Sumina E. V., Zyablikov D. V. Innovative regional development: needs for diversified economic
growth of Siberia under the conditions of reindustrialization 515
Tovstonoshenko V. N. Innovation activities risks of the rocket and space industry 523

Information about the authors 533

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

УДК 519.854.33

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 292–299

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ДАЛЬНЕЙ РАДИОНАВИГАЦИИ

А. М. Алешечкин, О. А. Тронин

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 28
E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru

Рассматривается проблема повышения точности определения координат объектов по сигналам наземных радионавигационных систем (РНС) дальней радионавигации. Примерами таких систем являются система глобального действия «Омега» ОНЧ-диапазона, система НЧ-диапазона «Лоран-С», а также системы среднечастотного диапазона «Спрут», «Брас» и др. Поскольку данные системы работают в диапазоне сверхдлинных, длинных и средних волн, на результаты измерений радионавигационных параметров (разности дальностей, квазидальности и т. д.) оказывают влияние характеристики подстилающей поверхности, в результате чего измеренные значения этих параметров могут существенно отличаться от своих истинных значений. К характеристикам подстилающей поверхности относят удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость. В случае, если удается обеспечить точное определение значений характеристик подстилающей поверхности, можно, используя известные методы, рассчитать поправки к измеренным значениям радионавигационных параметров. Далее измеренные значения радионавигационных параметров могут быть скорректированы, что позволит повысить результирующую точность определения места объектов.

Для определения проводимости и диэлектрической проницаемости можно использовать аппаратуру электромагнитных методов (ЭММ) определения параметров подстилающей поверхности, разработанную в г. Красноярске отделом геофизики ОАО «Алмаззолотоавтоматика» при участии кафедры радиоэлектронных систем Сибирского федерального университета. Основное назначение данной аппаратуры состоит в проведении разведки полезных ископаемых.

Аппаратура обеспечивает измерение в диапазоне частот, соответствующих рабочим диапазонам исследуемых РНС. Это позволяет проводить измерения параметров подстилающей поверхности на значениях рабочих частот РНС, а также способствует более точному определению параметров подстилающей поверхности. Приведены математические выражения, связывающие параметры подстилающей поверхности с измеренными значениями составляющих поля, а также номограмма, по которой можно определять значения проводимости и диэлектрической проницаемости по результатам измерений, выполненных прибором.

Дано описание рабочей программы, выполняющей расчет параметров подстилающей поверхности, предназначенной для выполнения на персональном компьютере в среде операционной системы MicroSoft Windows XP/7. Разработанная программа обеспечивает автоматизированный ввод результатов измерений с измерительного блока прибора и расчет значений параметров подстилающей поверхности. Полученные результаты расчета выводятся в файл, который в дальнейшем может быть считан и обработан при помощи офисной программы Microsoft Excel.

Делается вывод о возможности использования разработанного прибора и программы для определения параметров подстилающей поверхности, требуемых для повышения точности решения задач определения места по сигналам РНС дальней навигации, работающих в низкочастотной части радиодиапазона. Приведены и другие возможные области применения описанного прибора как в технике связи, так и по своему прямому назначению – в электроразведке.

Ключевые слова: радионавигационная система, измерения, подстилающая поверхность, диэлектрическая проницаемость, удельное сопротивление, удельная проводимость.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 292–299

ACCURACY INCREASE OF DETERMINING NAVIGATION PARAMETERS FOR LONG-RANGE RADIONAVIGATION SYSTEMS

A. M. Aleshechkin, O. A. Tronin

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

In the given article the problem of increasing the objects coordinates' determination accuracy from ground-based long-range radio navigation systems (RNS) was considered. The examples of such systems are the system of global coverage "Omega", operating in VLF-band, the system of LF-band "Loran-C", as well as MF-band systems "Sprut", "Bras", and others. As these systems operate in a low-frequency part of the radio spectrum, the results of measurements of the navigation parameters (differences of ranges, quasi-ranges, etc.) are influenced by characteristics of the underlying surface, resulting that the measured values of these parameters may vary significantly from their true values. The characteristics of the underlying surface include such parameters as resistivity and dielectric permittivity. If it is possible to provide a precise definition of the values of the characteristics of the underlying surface, it will be possible to calculate corrections to the measured values of the navigation parameters using known methods. Further, the measured values of the navigation parameters can be adjusted, which will increase the overall accuracy of determining the object's coordinates.

To determine the conductivity and the dielectric permittivity electromagnetic methods (EMM) equipment to determine the parameters of the underlying surface can be used. This equipment was developed in Krasnoyarsk Department of Geophysics OJSC "Almazzolotoavtomatika" with the participation of the Department of radio Electronic systems, of Siberian Federal University. The main purpose of this equipment is mineral exploration.

The equipment provides measurements in the frequency band, corresponding to the operating band of the investigated radio-navigation systems. It allows to measure parameters of the underlying surface on the RNS operating frequencies values, and contributes to a more precise determination of the underlying surface parameters. In the article the mathematical expressions relating the parameters of the underlying surface with the measured values of the components of the field were presented, as well as a monogram, which can determine the values of conductivity and dielectric permittivity from measurements, made of the device.

The description of the working program that performs the calculation of the parameters of the underlying surface, designed to run on a personal computer in the operating system environment Microsoft Windows XP/7/8 was given. The developed program provides automated input of measurement data from the measuring unit and the calculation of the underlying surface parameters values. The calculated results are output to a file, which can later be read and processed using Microsoft Office Excel program.

At the end of the article the conclusion about the possibility of using the developed tool to determine the parameters of the underlying surface, required to improve the accuracy of coordinates determination using long-range RNS, operating in low-frequency part of the radio spectrum is given. The other possible applications of the device described as in communication technology, and for its intended purpose – in the electric prospecting are shown.

Keywords: radio navigation systems, measurements, underlying surface, dielectric permittivity, specific resistivity, specific conductivity.

Введение. Несмотря на широкое распространение спутниковых радионавигационных систем наземные средства и системы радионавигации продолжают играть важную роль в координатно-временном обеспечении морских объектов.

Наиболее экономически оправданным в морских условиях является использование систем дальней радионавигации (СДН) [1], поскольку данные системы обеспечивают наибольшую площадь рабочей зоны. Для обеспечения наибольшей дальности действия и упрощения построения СДН как правило обеспечивают работу в разностно-дальномерном режиме, а излучение сигналов осуществляется в диапазоне километровых или мириаметровых волн. Все СДН работают на расстояниях до нескольких тысяч километров, при этом требуемая дальность действия систем обеспечивается при помощи поверхностных волн.

Виды радионавигационных систем дальней навигации. Основными элементом СДН являются сети синхронизированных между собой опорных станций (ОС), располагаемых в точках с известными координатами, при этом передатчики станций как правило синхронизированы со шкалой всемирного координированного времени UTC.

К системам дальней навигации относят СДН Loran-C и Omega [2]. Основные технические характеристики данных СДН приведены в таблице [1].

Система Loran-C является импульсно-фазовой СДН, основу которой составляют цепочки из одной ведущей (M) и двух-четырех ведомых (W, X, Y, Z) ОС, работающих в диапазоне длинных волн, где значение несущей частоты составляет около 100 кГц. Зоны действия цепочек перекрывают основные трансокеанские маршруты, а также прибрежные районы ряда стран. Импульсный характер сигналов ОС используется для разрешения неоднозначности фазовых измерений. Российским аналогом СДН Loran-C является система «Чайка».

Система Omega – фазовая СДН, основу которой составляют восемь независимых ОС (A, B, C, ..., H), расположенных так, чтобы получить глобальную зону действия (рис. 1). Глобальность системы достигается за счет использования диапазона сверхдлинных волн (значения несущих частот составляют от 11 до 14 кГц), которые огибают Землю и слабо поглощаются при распространении.

Помимо СДН в радионавигационном плане Российской Федерации указывается на необходимость использования радионавигационных систем (РНС) ближней навигации [3; 4]. Данные системы работают в средневолновом (СВ) диапазоне. Примерами СВ РНС являются система «Брас», которая выпускалась для морского обеспечения, начиная с 1970-х годов, а также РНС «Спрут», разрабатываемая в Сибирском федеральном университете совместно с АО «НПП «Радиосвязь» г. Красноярска. Данная система обеспечивает дальность действия до 600 км при работе в частотном диапазоне 1,6–2,2 МГц [5–8].

Основные технические характеристики СДН

Параметр	Loran-C	Omega
Дальность действия днем (ночью), тыс. км	2,2–2,6	Глобальная
Погрешность линии положения ($2\sigma_{ЛП}$), км	0,2 (0,6)	1,85 (3,7)
Погрешность определения местоположения ($2\sigma_{М}$), км: прогнозируемая повторяющаяся	 0,46 0,018–0,09	 3,7–7,4 3,7–7,4
Возможное число измерений за 10 с	100–200	1
Возможность разрешения многозначности	Имеется	Требуется знание местоположения с точностью ± 66,7 км
Диапазон частот, кГц	100	10–14
Число частотно-кодовых каналов	24	24
База системы, тыс. км	0,9–1,5	9–15

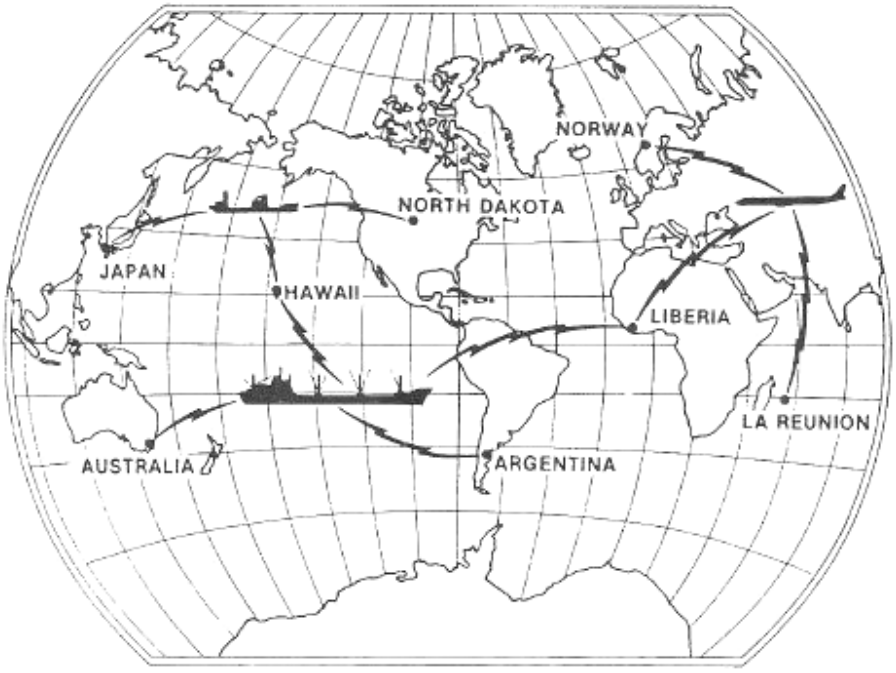


Рис. 1. Расстановка опорных станций СДН «Омега»

Необходимость учета параметров подстилающей поверхности в РНС. Недостатком рассмотренных систем является то, что работа в перечисленных диапазонах СДВ, ДВ и СВ приводит к появлению дополнительной погрешности измерений, обусловленной влиянием подстилающей поверхности [2; 9]. Данная составляющая погрешности может существенно исказить результаты измерений радионавигационных параметров и, как следствие, координат определяющихся объектов.

Для определения поправок к измеренным значениям радионавигационных параметров (РНП) требуется учет таких параметров подстилающей поверхности, как удельная проводимость σ и диэлектрическая проницаемость ε подстилающей поверхности. Методики учета данных параметров при расчете поправок к измеренным значениям РНП описаны в соответствующей литературе, например в [10], и могут быть использованы в программах вторичной обработки результатов радионавигационных измерений, выполняемых СДН или РНС.

Аппаратура электромагнитных методов. Рассмотрим аппаратуру определения параметров подстилающей поверхности, которая может быть использована для определения проводимости и диэлектрической проницаемости морской воды или участков суши, лежащих на трассе распространения радиоволн.

Аппаратура электромагнитных методов (ЭММ), основанная на применении гармонических электромагнитных полей, разработана отделом геофизики ОАО «Алмаззолотоавтоматика» совместно с кафедрой радиоэлектронных систем Сибирского федерального университета [11]. В настоящее время выпуск и модернизацию аппаратуры продолжает Сибирский федеральный университет. Измерения в частотном диапазоне от 19,5 Гц до 2,25 МГц могут проводиться с помощью следующих комплексов аппаратуры ЭММ:

– комплекс аппаратуры низкочастотной (КАН-ЭММ) – диапазон частот $19{,}5–10\cdot10^3$ Гц;

– комплекс аппаратуры среднечастотной (КАС-ЭММ) – $(20–160)\cdot10^3$ Гц (рис. 2);

– комплекс аппаратуры высокочастотной (КАВ-ЭММ) – $(281–2250)\cdot10^3$ Гц.

Рис. 1. Комплекс аппаратуры среднечастотной КАС–ЭММ (20–160 кГц):
1 – передатчик; 2 – микровольтметр; 3 – передающая (приемная) антенна

Принцип действия аппаратуры ЭММ. Принцип работы аппаратуры ЭММ состоит в том, что в исследуемой среде при помощи подключенного к антенне генератора создается гармоническое электромагнитное поле, характер распространения которого зависит от электромагнитных свойств среды. Источником поля является передающая магнитная антенна. С помощью приёмной антенны, расположенной на расстоянии r от передающей, измеряются последовательно во времени амплитуды вертикальной h_z и продольной h_r составляющих магнитного поля, а также разность их фаз $\Delta\varphi$. При дополнении аппаратуры угломерным устройством могут быть напрямую измерены следующие элементы эллипса поляризации магнитного поля в точке приема: большая полуось эллипса поляризации a, малая полуось эллипса поляризации b и угол наклона большой полуоси эллипса поляризации магнитного поля к горизонту Ψ. Используя измеренные параметры h_z, h_r, $\Delta\varphi$ или a, b, Ψ, можно определить диэлектрическую проницаемость среды ε и удельную электрическую проводимость σ (или удельное электрическое сопротивление $\rho = 1/\sigma$).

Благодаря индуктивному (бесконтактному) способу возбуждения и приёма электромагнитного поля, аппаратура позволяет выполнять полевые работы практически в любое время года и независимо от состояния поверхности исследуемых площадей (снежный и ледяной покровы, вода, мёрзлые породы, скальные грунты, крупноглыбовые осыпи, сухие пески и т. п.) в тайге, тундре, пустыне и на морских акваториях.

Расчет проводимости и диэлектрической проницаемости. Известно несколько вариантов раздельного определения величин ρ и ε путем одновременного изучения двух различных характеристик электромагнитного поля (ЭМП) [12; 13]. Различные варианты (и соответствующие им измерительные установки) имеют разную разрешающую способность и сложность построения аппаратуры [14]. При проведении измерений с помощью комплексов КАС-ЭММ или КАВ-ЭММ целесообразно использовать вариант определения ρ и ε по измерениям угла наклона к горизонту большой полуоси эллипса поляризации магнитного поля Ψ и отношения амплитуд напряжённостей магнитного поля, соответствующих большой полуоси эллипса поляризации A к его малой полуоси B (A/B), которое равно отношению соответствующих магнитных чисел (a/b). Магнитные числа a, b и угол Ψ рассчитываются по следующим формулам [15]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{2}\left[|h_z|^2 + |h_r|^2 + \sqrt{\left(|h_z|^2 + |h_r|^2\right)^2 - 4|h_z|^2|h_r|^2\sin^2\Delta\varphi}\right]};$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{2}\left[|h_z|^2 + |h_r|^2 - \sqrt{\left(|h_z|^2 + |h_r|^2\right)^2 - 4|h_z|^2|h_r|^2\sin^2\Delta\varphi}\right]};$$

$$\Psi = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{2|h_z|\cdot|h_r|\cos\Delta\varphi}{|h_r|^2 - |h_z|^2},$$

где $|h_z|$ и $|h_r|$ – модули магнитных чисел вертикальной и радиальной составляющих поля магнитного диполя; $\Delta\varphi$ – разность их фаз [15; 16].

Магнитные числа h_z и h_r являются сложными функциями волнового числа среды *k*, математические выражения для которых приведены в [15]. В свою очередь, волновое число среды *k* зависит от σ и ε следующим образом [16]:

$$k = \sqrt{\omega^2 \cdot \varepsilon_a \cdot \mu_a \cdot \left(i\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_a} - 1 \right)},$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота поля; $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды; $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды (для немагнитных сред μ = 1, $\mu_a = \mu_0$); $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Сложность данных формул не позволяет получить аналитические выражения для σ и ε. Поэтому для их определения используется номограмма, построенная в координатах Ψ и a/b, приведенная на рис. 3. Данная номограмма рассчитана при значении разноса установки *r* = 2,5 м и для рабочей частоты *f* = 2,25 МГц.

Применена кусочно-линейная аппроксимация функций номограммы с переменным шагом по аргументу, находимым исходя из заданной погрешности интерполяции на каждом интервале.

Значения функций в узлах интерполяции представлены в программе обработки в виде таблиц. По измеренным величинам Ψ и a/b = A/B определяются номера отрезков интерполяции, считываются из таблиц соответствующие границам этих отрезков значения функций и по формуле линейной интерполяции вычисляются $\rho = 1/\sigma$ и ε.

Программа расчета параметров подстилающей поверхности. При работе в полевых условиях для автоматической обработки результатов геофизических измерений авторами разработана программа Geo2015, позволяющая автоматически выполнять расчет значений удельного сопротивления ρ, на основе которого определяется удельная проводимость подстилающей поверхности σ, а также диэлектрической проницаемости ε.

Разработанная программа обеспечивает ввод исходных результатов измерений по интерфейсу USB-2.0 от приборов КАН, КАС и КАВ и работает под управлением операционной системы Windows XP/7. Вид главного окна разработанной программы приведен на рис. 4.

В начале работы программа предлагает выбрать режим ввода результатов измерений прибора (поле «Главное меню» на рис. 4). При этом предусмотрено 2 режима ввода данных:

– ввод с выбором, при котором пользователю предоставляется возможность выбора файла, который будет считан из прибора и обработан;

– ввод всех данных – в этом случае из прибора вводятся и обрабатываются программой все имеющиеся в его памяти файлы измерений.

Последний пункт главного меню «Выход» используется для выхода из программы Geo2015 по окончании обработки результатов измерений.

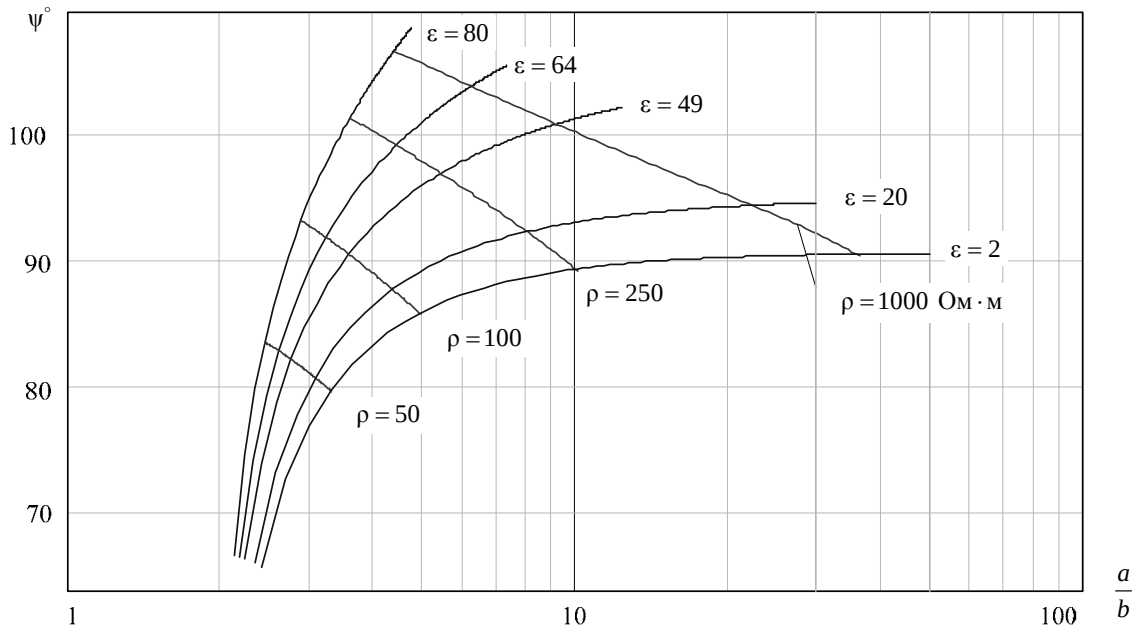


Рис. 3 Номограмма для определения ρ и ε для *r* = 2,5 м, f = 2,25 МГц

После выбора режима ввода результатов измерений программа предлагает выбрать номер последовательного порта компьютера (выпадающее меню с надписью «COM 9», показанное на рис. 4), который соединен с прибором. Затем в случае удачного подключения и выбора режима ввода с выбором исходных данных осуществляется выбор требуемого для обработки файла с использованием кнопок «Предыдущий», «Следующий» и «Выбрать» для подтверждения выбора. При этом в правой части окна рабочей программы индицируются данные, считанные из заголовков соответствующих файлов, в частности, дата выполнения измерений, номер файла в каталоге прибора, номер профиля наблюдений, рабочая частота измерений и ряд других параметров.

При нажатии кнопки «Выбрать» выбранный файл обрабатывается и результаты обработанных измерений записываются в файл DDMM_NN.csv, где DDMM – день и месяц даты создания файла в каталоге прибора, NN – номер файла в каталоге прибора, csv – расширение файла. Полученный файл может в дальнейшем просматриваться и редактироваться в программе MicroSoft Office Excel.

Примерный вид полученного файла обработанных результатов измерений приведен на рис. 5.

Полученный файл содержит в своей структуре следующие результаты:

– дата проведения измерений прибором;

– номер файла в каталоге прибора;

– удельное сопротивление ρ, вычисленное в соответствии с приведенными выше формулами (столбец 7 «Ro, Ом*м»), а также ряд других параметров.

Используя полученные значения удельного сопротивления ρ, можно вычислить удельную проводимость $\sigma = 1/\rho$.

В настоящее время авторами проводится доработка программы с целью обеспечения автоматического вычисления значения диэлектрической проницаемости ε в приведенной программе geo2015.exe, что позволит в дальнейшем использовать эти параметры для вычисления поправок к значениям РНП.

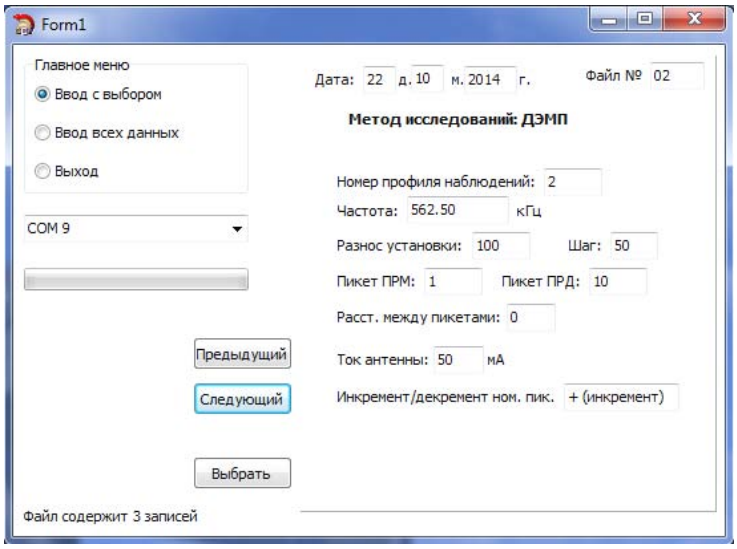


Рис. 4. Окно программы Geo2015

	1	2	3	4	5	6	7
1	Файл номер:	9					
2	Дата:	11.04.15					
3	Метод исследований:	ДЭМП					
4	Номер профиля наблюдений:	1					
5	Частота, Гц:	80000					
6	Разнос установки, м:	100					
7	Шаг наблюдений:	10					
8	Пикет приемника:	1					
9	Пикет передатчика:	10					
10	Расстояние между пикетами, м:	0					
11	Ток антенны, мА:	6010					
12	Номера пикетов:	- (декремент)					
13							
14	Пикет приемника	Пикет перед	Центр уст.	Hz	Hr	Hz/Hr	Ro,Ом*м
15	1	10	5.5	100.62	146.8	0.685	204.8
16	0	9	4.5	98.44	144.45	0.681	201.6
17	-1	8	3.5	100.23	151.72	0.661	192
18	-2	7	2.5	98.91	142.42	0.694	211.2

Рис. 5. Вид csv-файла обработанных результатов измерений

Заключение. Таким образом, использование разработанной программы и алгоритмов вычисления электрических параметров подстилающей поверхности σ и ε совместно с аппаратурой ЭММ типа КАН (КАС, КАВ) позволяет выполнять расчет поправок к значениям РНП и повысить точность определения координат морских объектов при использовании РНС, работающих в низкочастотной части радиодиапазона.

Следует отметить, что использование описанного прибора КАН не ограничивается радионавигационными системами СДВ, ДВ и СВ. Данный прибор может найти применение в связи, например, при определении параметров подстилающей поверхности в местах размещения передающих и приемных антенн и антенных полей.

Естественно, разрабатываемая программа и приборы КАН-, КАС-, КАВ-ЭММ также могут найти применение и при решении задач разведки полезных ископаемых, для проведения которой они изначально проектировались.

Библиографические ссылки

1. Авиационная радионавигация : справочник / А. А. Сосновский [и др.] ; под ред. А. А. Сосновского. М. : Транспорт, 1990. 264 с.

2. Радионавигационные системы сверхдлинноволнового диапазона / С. Б. Болошин [и др.] ; под ред. П. В. Олянюка, Г. В. Головушкина. М. : Радио и связь, 1985. 264 с. : ил.

3. Радионавигационный план Российской Федерации : утв. приказом № 118 Минпромторга России от 2.09.2008 г. (в ред. приказа Минпромторга России от 31.08.2011 г. № 1177).

4. Основные направления (план) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2013–2017 годы : утв. решением Совета глав правительств СНГ об Основных направлениях (плане) развития радионавигации государств – участников СНГ на 2013–2017 годы от 31 мая 2013 г. URL: http://aggf.ru/proekt/zakon/npa_min/minpromtorg/rnprf2013.docx (дата обращения: 14.04.2015).

5. Результаты экспериментальных исследований широкополосной радионавигационной системы средневолнового диапазона / А. М. Алешечкин [и др.] // Гироскопия и навигация. 2009. № 4 (67). С. 46–53.

6. Широкополосная радионавигационная система для морских потребителей / А. М. Алешечкин [и др.] // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии («НО-2007») : Тр. шестой Российской науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2007. С. 232–238.

7. Бортовая станция широкополосной системы морской радионавигации / А. М. Алешечкин [и др.] // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XIII Междунар. конф. Воронеж, 2007. Т. 3. С. 1932–1942.

8. Имитатор сигналов морской радионавигационной системы / А. М. Алешечкин [и др.] // Современное состояние и проблемы навигации и океанографии («НО-2007») : Тр. шестой Российской науч.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2007. С. 228–232.

9. Агафонников А. М. Фазовые радиогеодезические системы для морских исследований М. : Наука, 1979. 164 с.

10. Саломатов Ю. П. Инженерные методы расчета распространения радиоволн вдоль поверхности Земли : учеб. пособие / ИПК СФУ. Красноярск, 2009. 164 с.

11. Аппаратура индуктивных методов переменного гармонического тока для рудной и инженерной геологии / В. И. Иголкин [и др.] // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых : материалы науч. конф. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. С. 469–474.

12. Лебедев В. Ф., Царегородцев М. Е. Геофизические исследования дражных полигонов и перспективы изучения диэлектрической проницаемости // Колыма. 1983. № 2. С. 28–32.

13. Лебедев В. Ф. Влияние диэлектрической проницаемости на элементы эллипса поляризации поля вертикального магнитного диполя (однородное полупространство) // Опытно-методические исследования по опробованию геофизической аппаратуры, разрабатываемой и выпускаемой НПО «Сибцветметавтоматика» : раздел отчета за 1979 г. / НПО «СибЦМА». 1980. С. 144–148.

14. Тронин О. А. Методы измерения электрических свойств пород земной поверхности // Современные проблемы развития науки, техники и образования : сб. науч. тр. / ИПК СФУ. Красноярск, 2009. С. 225–229.

15. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л. : Недра, 1971. 216 с.

16. Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка. М. : Недра, 1991. 376 с.

References

1. Sosnovskiy A. A. et al. *Aviatsionnaya Radionavigatsiya: spravochnik* [Aviations Radionavigation : reference]. Moscow, Transport Publ., 1990, 264 p.

2. Boloshin S. B., Semenov G. A., Guzman A. S. *Radionavigatsionnye sistemy sverkhdlinnovolnovogo diapazona* [Radio navigation systems of superlong-wave range]. Moscow, Radio and svyaz Publ., 1985, 264 p.

3. *Radionavigatsionnyy plan Rossiyskoy Federatsii. Utverzhden prikazom № 118 Minpromtorga Rossii ot 2.09.2008 v redaktsii prikaza Minpromtorga Rossii ot 31.08.2011 № 1177.* [Radio navigational plan of the Russian Federation. No. 1177 is approved by the order No. 118 of Minpromtorg of Russia of 2.09.2008 in edition of the order of Minpromtorg of Russia of 31.08.2011].

4. *Osnovnye napravleniya (plan) razvitiya radionavigatsii gosudarstv-uchastnikov SNG na 2013 - 2017 gody : Utverzhdeny Resheniem Soveta glav pravitel'stv SNG ob Osnovnykh napravleniyakh (Plane) razvitiya radionavigatsii gosudarstv-uchastnikov SNG na 2013–2017 gody ot 31 maya 2013 goda.* [The main directions (plan) of development of radio navigation of the State Parties of the CIS for 2013 – 2017. Are approved by the Decision of Council of heads of governments of the CIS on the Main directions (Plan) of development of radio navigation of the State Parties of the CIS for 2013 – 2017 of may 31, 2013]. (In Russ.) Available at: http://aggf.ru/proekt/

zakon/npa_min/minpromtorg/rnprf2013.docx. (accessed 14.04.2015).

5. Aleshechkin A. M., Bondarenko V. N., Kokorin V. I. [Results of pilot studies of broadband radio navigational system of mediumwave range]. *Giroskopiya i navigatsiya.* 2009, No. 4(67), P. 46–53 (In Russ.).

6. Aleshechkin A. M., Bondarenko V. N., Kokorin V. I. [Broadband radio navigational system for sea consumers]. *Trudy 6 Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii"* [Proc. 6th. Russian scientific and technical conference "Current state and problems of navigation and oceanography"]. St. Petersburg, 2007, P. 232–238 (In Russ.).

7. Aleshechkin A. M., Bondarenko V. N., Byakov A. G. *Bortovaya stantsiya shirokopolosnoy sistemy morskoy radionavigatsii* [Onboard station of broadband system of sea radio navigation]. *Sbornik trudov 13 Mezhdunarodnoy Konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* [Proc. 13th international conference "Radar-location, Navigation, Communication"]. Voronezh, 2007, Vol. 3, Pp. 1932–1942 (In Russ.).

8. Aleshechkin A. M., Bondarenko V. N., Kokorin V. I. [Simulator of signals of sea radio navigational system]. *Trudy 6 Rossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii"* [Proc. 6th. Russian scientific and technical conference "Current state and problems of navigation and oceanography"]. St. Petersburg, 2007, P. 228–232 (In Russ.).

9. Agafonnikov A. M. *Fazovye radiogeodezicheskie sistemy dlya morskikh issledovaniy* [Phase radio geodetic systems for sea researches]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 164 p.

10. Salomatyov Yu. P. *Inzhenernye metody rascheta rasprostraneniya radiovoln vdol' poverkhnosti Zemli* [Engineering methods of calculation of propagation of radio waves along Earth surface]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2009, 164 p.

11. Igolkin V. I., Lebedev V. F., Khokhlov M. F., Tronin O. A., Aleshechkin A. M. [The equipment of inductive methods of alternating harmonious current for ore and engineering geology]. *Materialy nauchnoy konferentsii " Sovremennye problemy geologii i razvedki poleznykh iskopaemykh"* [Proc. Russian scientific conference "Modern problems of geology and investigation of minerals"]. Tomsk, 2010, P. 469–474 (In Russ.).

12. Lebedev V. F., Tsaregorodtsev M. E. [Geophysical surveys of grounds and prospect of studying of dielectric permeability]. *Kolyma*. 1983, No. 2, P. 28–32 (In Russ.).

13. Lebedev V. F. [Influence of dielectric permeability on elements of an ellipse of polarization of a field of a vertical magnetic dipole (uniform half-space)]. *Opytno-metodicheskie issledovaniya po oprobovaniyu geofizicheskoy apparatury, razraba-tyvaemoy i vypuskaemoy NPO «Sibtsvetmetavtoma-tika» : razdel otcheta za 1979 g.* [Funds Science and Production Association "Sibtsvetmetavtomatika", The report "Skilled and methodical researches on approbation of the geophysical equipment developed and released by SPA Sibtsvetmetavtomatika for 1979"]. Krasnoyarsk, 1980, P. 144–148.

14. Tronin O. A. [Methods of measurement of electric properties of breeds of a Earth surface]. *Trudy nauchnoy koferentsii "Sovremennye problemy razvitiya nauki, tekhniki i obrazovaniya"* [Proc. Scientific conference "Modern problems of development of science, equipment and education"]. Krasnoyarsk, 2009, P. 225–229 (In Russ.).

15. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignat'ev G. F. *Elektromagnitoe profilirovanie* [Electromagnetic profiling]. Leningrad, Nedra Publ., 1971, 216 p.

16. Yakubovskiy Yu. V., Renard I. V. *Elektrorazvedka* [Electroinvestigation]. Moscow, Nedra Publ., 1991, 376 p.

© Алешечкин А. М., Тронин О. А., 2015

УДК 004.932:94, 001.891.57, 004.413.5, 004.415.5:532

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 300–309

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОКОНТУРИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХМЕРНОГО ТОЧЕЧНОГО ПОТОКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В. П. Денисов[1], Д. В. Дубинин[1], А. И. Кочегуров[2*], В. Е. Лаевский (V. Geringer)[3]

[1]Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 40
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
[3]Государственный объединённый университет Баден-Вюртемберга,
инженерный факультет
Германия, D-88045, г. Фридрихсхафен, Fallenbrunnen, 2
[*]E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

Представлены результаты исследования качества оконтуривания для трех алгоритмов (Marr-Hildreth, ISEF и Canny), полученные с помощью комплексного метода, предложенного в работе Boaventura и Gonzaga. Исследования проводились в среде программно-алгоритмического комплекса стохастического моделирования «КИМ СП». Дано краткое описание возможностей программно-алгоритмического комплекса, приведена его обобщённая структурная схема, а также показано формирование последовательности структур морфологий эталонных пространственно-временных сигналов (ЭПВС) и их растровых изображений. В ходе получения и обобщения результатов численных экспериментов были использованы методы и подходы статистического моделирования, а эталонные изображения были аппроксимированы двумерным точечным потоком восстановления. Оценки эффективности оконтуривания для трех исследуемых алгоритмов (Marr-Hildreth, ISEF и Canny) получены при различных уровнях аддитивного шума. Шум формировался датчиком случайных чисел с распределением, близким к нормальному распределению. В качестве критерия отношения сигнал/шум принималось отношение энергии сигнала к дисперсии шума. Анализ эффективности алгоритмов проводился на основе морфологий эталонных изображений ЭПВС типа A и F. Результаты исследований представлены в виде совокупности оценок обобщённого показателя качества, оценок вероятностей правильного обнаружения и пропуска контуров, а также вероятности ложной тревоги в зависимости от отношения сигнал/шум. Вычисление вероятностных оценок отдельных составляющих обобщенного критерия качества связано, прежде всего, с разной значимостью этих составляющих в таких прикладных областях, как космонавтика, навигация, геология, дефектоскопия и др. Сопоставление полученных результатов для трех алгоритмов оконтуривания и двух типов морфологий позволило не только дать объективную оценку эффективности применения комплексного метода для сравнения качества алгоритмов поиска и локализации границ, но и сформировать рекомендации по выбору в конкретной прикладной задаче того или иного алгоритма, в зависимости от уровня шума и типа морфологии, лежащей в основе построения изображения.

Ключевые слова: двумерный точечный поток восстановления, стохастическое компьютерное моделирование, исследование на моделях, выделение контуров, оценка эффективности, сравнение алгоритмов.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 300–309

THE RESULTS OF THE INVESTIGATION OF THE INTEGRATED PERFORMANCE EVALUATION METHOD OF EDGE DETECTION BASED ON THE TWO-DIMENSIONAL RENEWAL STREAM

V. P. Denisov[1], D. V. Dubinin[1], A. I. Kochegurov[2*], V. E. Laevski (V. Geringer)[3]

[1]Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[1]National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[3]Baden-Wuerttemberg Cooperative State University, Faculty of Engineering,
Friedrichshafen, Germany Campus, Fallenbrunnen 2, Friedrichshafen, D-88045, Germany
[*] E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

The paper presents the results of investigation of the edge detection quality for three algorithms ("Marr-Hildreth", "ISEF" and "Canny"), obtained using the integrated method proposed in the work of Boaventura and Gonzaga. The studies were conducted in the environment of the program-algorithm complex of stochastic modelling "KIM SP". The features of the program-algorithm complex are briefly described along with its integrated block diagram given. And the sequence composition of the morphologies structures of the reference space-time signals (RSTS) and their bitmap images are presented. The methods and approaches of the statistical modelling were used in obtaining and summarizing the results of the numerical experiments and the reference images were approximated with a two-dimensional hi-rise renewal stream. The edge detection performance for three algorithms under study ("Marr-Hildreth", "ISEF" and "Canny") has been evaluated under different levels of additive noise. The noise was generated by a random data generator with a near-normal distribution. The signal energy-to-noise-dispersion ratio was taken as a criterion of the signal-to-noise ratio. The analysis of the algorithms efficiency was based on the morphologies of RSTS reference images of "A" and "F" type. The results of the investigation are presented as a set of the overall quality factor estimates, the estimated probability of the correct edge detection and omission, as well as the false alarm probability against the signal-to-noise ratio. The calculation of the estimated probability of the certain components of the overall quality factor is attributed first and foremost to their various importance in such application domains as aerospace, navigation, geology, nondestructive testing and others. Comparison of the results obtained for three edge detection algorithms and two types of morphologies enabled not only to provide an objective performance estimation of using the integrated method for comparison of the quality of the search and edge location algorithms, but also to produce the selection guideline in the specific application of a particular algorithm depending on the noise level and the morphology type behind imaging.

Keywords: two-dimensional renewal stream, stochastic computer simulation, research on models, edge detection, performance evaluation, comparison of algorithms.

Введение. С развитием цифровой вычислительной техники появилась возможность создания высокоэффективных систем, предназначенных для анализа, синтеза, обработки и передачи оптической информации. Изображения являются одновременно результатом и объектом исследований в космонавтике, геологии, картографии, навигации, дефектоскопии и во многих других областях человеческой деятельности. В большинстве работ, связанных с созданием и проверкой новых алгоритмов обработки пространственно-временных сигналов, имеет место ряд субъективных моментов. Одним из основных недостатков является использование в качестве эталонных изображений реальных снимков различных предметов, построек или людей [1–3]. Это позволяет провести настройку создаваемого алгоритма обработки информации на определённую предметную область, но упускаются моменты, характерные для других областей, что затрудняет оценку качества элементов программного обеспечения, проведение объективного сравнения используемых реализаций алгоритмов друг с другом. Объективным подходом к решению задачи сопоставления реализаций алгоритмов является цифровое имитирование моделирования реализуемой системы или её части. Компьютерное имитирование моделирования позволяет проведение анализа реализации исследуемого алгоритма в определённых, строго контролируемых условиях, создание предпосылок для проведения факторного анализа, формирует подходы и методы оценки качества систем и программ. Ключевым моментом в процессе компьютерного моделирования является создание многомерных стохастических полей (яркостные поля плоских изображений, температурные и другие поля атмосферы, океана и т. п. [4; 5]), которые составляют основу имитационного моделирования, позволяют вносить вероятностный фактор [4; 5] в процесс моделирования, детализировать и обобщать предмет исследования, улучшая качество постановки эксперимента [6] и качество получаемых результатов [5; 7; 8].

В настоящее время разработано большое количество алгоритмов оконтуривания, скелетизации, сегментации, привязки и т. д., что требует объективного сравнения качества реализаций алгоритмов между собой. Существует множество подходов и методов их оценки, в том числе операторов получения растрового контурного поля (РКП) [6; 9–13]. Интерес к таким работам не ослабевает [14]. В связи с этим в данной работе проведены исследования комплексного, статистического показателя качества эффективности работы операторов поиска и локализации границ, включающего четыре метрики [15; 16] в среде комплекса стохастического моделирования «КИМ СП» [17]. В ходе получения и обобщения результатов численных экспериментов использованы методы и подходы статистического моделирования, эталонные изображения аппроксимированы двумерным точечным потоком восстановления [4; 7; 8; 18]. Приведены графики составляющих статистических оценок обобщённого показателя качества при различных уровнях шума для трех квазиоптимальных алгоритмов оконтуривания (Marr-Hildreth, ISEF и Canny). Получены оценки вероятностей правильного обнаружения, ошибок первого и второго рода. Предложены направления дальнейших исследований.

Структура программного комплекса и основные этапы моделирования. В ряде предшествующих работ были сформулированы, математически формализованы и решены задачи построения структур морфологий эталонных пространственно-временных сигналов и их растровых представлений [5; 7; 8]. Проведён анализ статистики морфологии генерируемых полей [19]. Реализованы и проверены алгоритмы генерации ЭПВС [18]. Это позволило подготовить основу для этапа создания комплекса имитационного моделирования случайных пространственно-временных полей «КИМ СП». Основной целью разработки являлось создание специального математического и программного обеспечения, позволяющего генерировать

эталонные пространственно-временные сигналы, проводить их статистический анализ, определять значения совокупности параметров построения поля, накапливать статистику для дальнейших экспериментов.

Программный комплекс имеет модульную структуру. Его обобщённая схема приведена на рис. 1.

Программный комплекс состоит из пяти модулей и СУБД. Модуль ввода параметров генерации эталонного пространственно-временного сигнала (P) позволяет пользователю задать тип морфологии формируемого стохастического поля, значение вероятностей появления формирующих элементов структуры эталонных изображений, количество и размеры ЭПВС, их маштабирование. Входные параметры могут как задаваться вручную, так и быть считаны из базы данных.

По заданной совокупности параметров модуль генерации структуры пространственно-временного сигнала формирует совокупность многомерных стохастических полей, преобразует их описание к векторному виду (V), создает набор сегментов изображения и растровые представления (R).

Модуль статистической обработки позволяет оценивать характеристики и статистические свойства порожденного пространственно-временного сигнала $(\hat{X})$:

– корреляционную функцию поля при горизонтальном, вертикальном или диагональном сдвигах;

– оценку зависимости среднего числа сегментов и СКО от количества отсчётов и радиуса корреляции ПВС;

– аналитические зависимости вышеперечисленных оценок на основе метода наименьших квадратов;

– статистику проверки гипотез (например, гипотезы о нормальном законе распределения среднего числа сегментов на основе критерия согласия Пирсона с учётом коррекции Йетса [20]).

Результаты статистической обработки $(\hat{X})$ отображает модуль визуализации. Их можно сравнить с расчетными характеристиками (X), полученными от модуля расчета теоретических характеристик ЭПВС, и оценить степень их соответствия.

Комплекс имитационного моделирования позволяет формировать структуры различных разновидностей морфологий ЭПВС [5; 6]: A, B, C, D, E, F, FB, FC, FD, FE. Частная реализация структур случайных полей морфологии A, F, FB, FC, FD, FE приведена на рис. 2, их растровые представления – на рис. 3.

На первом этапе моделирования на основе двумерного точечного потока восстановления было создано векторное описание структур эталонных изображений с морфологиями A и F (рис. 2). Полученное векторное описание границ представляет собой не что иное, как связную последовательность координат точек, описывающих прохождение контурных векторов. Непрерывность структуры пространственно-временных сигналов обусловлена свойствами формирующего точечного потока восстановления.

На втором этапе формировалось растровое изображение размером $M \times K$ точек (рис. 3), накапливались статистики эталонных пространственно-временных сигналов обоих морфологий, их векторного и семантического описания, а также разновидностей эталонных изображений с различной степенью зашумлённости.

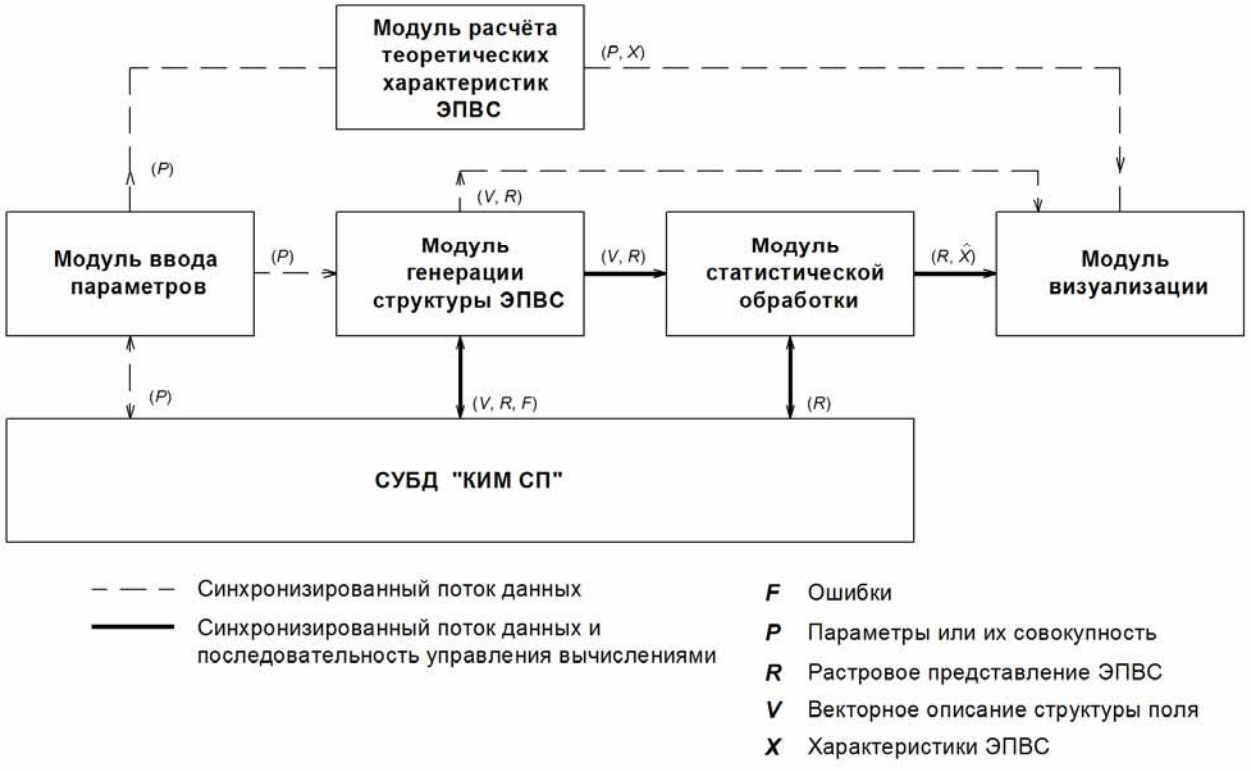


Рис. 1. Структурная схема комплекса имитационного моделирования

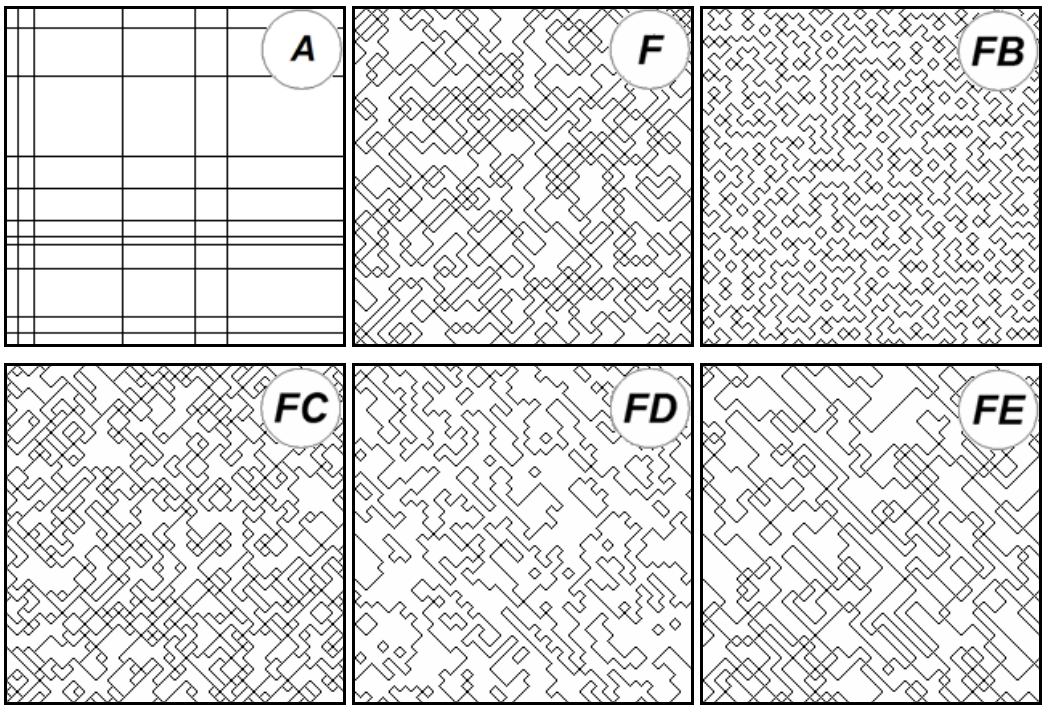


Рис. 2. Структуры морфологий *A*, *F*, *FB*, *FC*, *FD*, *FE*

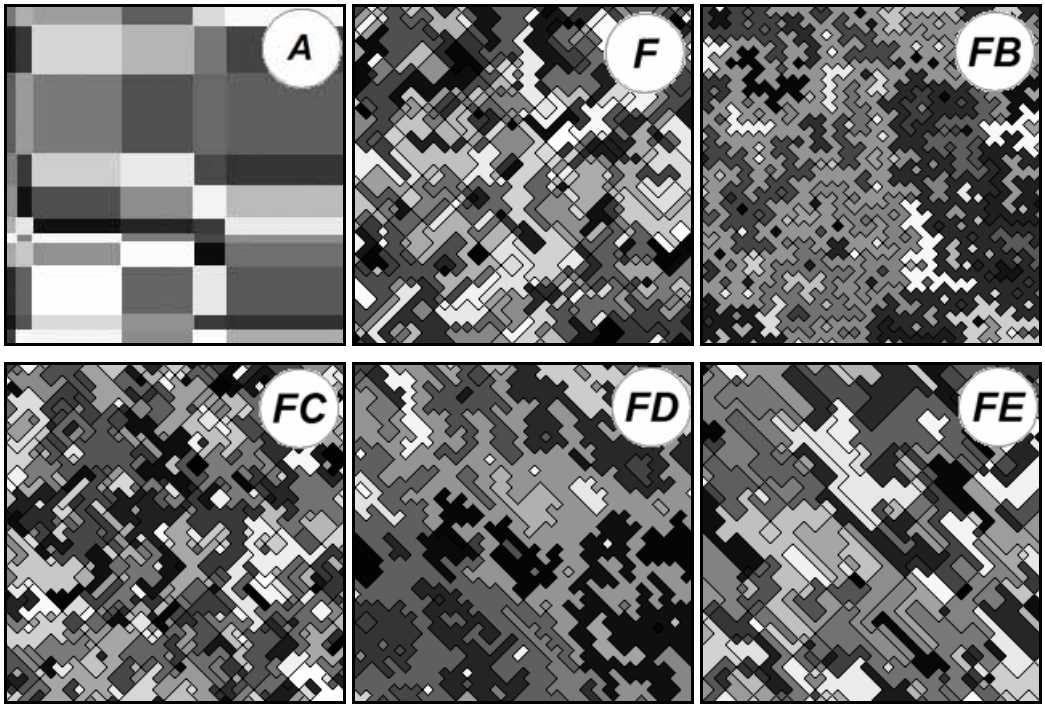


Рис. 3. Растровые представления морфологий *A*, *F*, *FB*, *FC*, *FD*, *FE*

На третьем этапе результирующая серия изображений подвергалась обработке различными типами контурных детекторов с целью получения бинарного, растрового изображения контуров и необходимых данных по запланированному ходу эксперимента.

Обобщая вышесказанное, отметим, что в этой работе были использованы три разновидности операторов получения РКП изображения: Marr-Hildreth [21], ISEF [22] и Canny [23]. На основе априорно известной совокупности контурных векторов производилось вычисление показателей качества детектирования, накопление необходимой статистики поведения операторов получения РКП изображения в определённых условиях. Это позволило в ходе проведения четвёртого этапа рассчитать комплексный показатель качества, предложенный Boaventura и Gonzaga, при раз-

личных отношениях сигнал/шум для различных морфологий ЭПВС; получить оценки вероятности правильного обнаружения ошибок первого и второго рода, качества восстановленной границы на основе метрики Пратта [9] для обобщённого комплексного критерия качества в окрестности 5 × 5 при различных отношениях сигнал/шум; построить графики как составляющих, так и комплексного критерия качества оконтуривания и провести обобщение полученных результатов.

Полученные результаты и предполагаемые исследования. Эффективность методов получения растрового контурного поля трудно оценить из-за отсутствия четкого определения ряда понятий проблемной области. Например, нет строгого, математически обоснованного, формализованного определения, что является границей объекта. В работе [15] получение оценок эффективности рассматривается с позиции решения проблемы бинарной классификации. Обобщённый показатель качества представляется в евклидовом пространстве как

$$DL = \sqrt{\left(P_{co} - 1\right)^2 + (IMP - 1)^2 + P_{nd}^2 + P_{fa}^2}\ , \qquad (1)$$

где P_{co} – вероятность правильного обнаружения границы; IMP – оценка качества по критерию Пратта; P_{nd} – вероятность пропуска границы; P_{fa} – вероятность ложного выделения границ.

Значение обобщённого показателя качества DL изменяется в интервале от 0 до 2. Его минимальное значение получается при $P_{co} = 1$, $IMP = 1$, $P_{nd} = 0$, $P_{fa} = 0$.

Сравнивая значения оценки DL для эталонных изображений, построенных на основе морфологий пространственно-временных сигналов типа A или F (рис. 4), можно заметить, что поведение DL для различных реализаций алгоритмов оконтуривания имеет общие тенденции. Например, среди операторов оконтуривания Canny, ISEF и Marr-Hildreth для всех типов изображений, оператор Marr-Hildreth является наилучшим возможным решением при получении РКП изображения для малых отношений сигнал/шум. Анализируя поведение оценки критерия качества DL для изображений, полученных только на основе морфологии типа A, видно, что при отношениях сигнал/шум больших 34 дБ предпочтение необходимо отдать оператору ISEF. Оператор Canny уступает на всём промежутке значений отношения сигнал/шум оператору Marr-Hildreth, и только при отношениях сигнал/шум меньших 8 дБ незначительно превосходит оператор ISEF. Оператор ISEF лучше операторов Canny и Marr-Hildreth при больших отношениях сигнала к шуму.

Анализируя поведение оценки критерия качества DL для изображений, полученных на основе морфологии типа F, можно отметить, что оператор Marr-Hildreth позволяет значительно лучше выделять РКП изображения при отношениях сигнал/шум меньших 20 дБ. При отношениях сигнал/шум больших 20 дБ предпочтение следует отдавать оператору Canny. При этом оператор Canny показал значительно лучшие результаты детектирования диагональных элементов при высоких отношениях сигнал/шум.

На рис. 5 приведены результаты расчёта вероятности правильного определения границы для морфологии A и морфологии F. Расчёт значений P_{co} производился по следующей формуле [15]:

$$\hat{P}_{co} = \frac{TP}{\max\left\{N_I, N_B\right\}}, \qquad (2)$$

где N_I и N_B – число точек контура в эталонном и полученном РКП изображениях соответственно.

Сравнивая поведения $\hat{P}_{co}$ для эталонных изображений, построенных на основе морфологии типа A или F (рис. 5), видно, что графики, описывающие $\hat{P}_{co}$ для различных реализаций алгоритмов оконтуривания, имеют общую тенденцию. Анализируя вероятность правильного обнаружения $\hat{P}_{co}$ для изображений, полученных на основе морфологии типа A, можно отметить, что реализация алгоритма Canny даёт наихудшие результаты практически для всех соотношений сигнал/шум. Имплементация алгоритма Marr-Hildreth на всём промежутке отношений сигнал/шум превосходит алгоритм Canny и уступает реализации ISEF на промежутке сигнал/шум < 32 дБ.

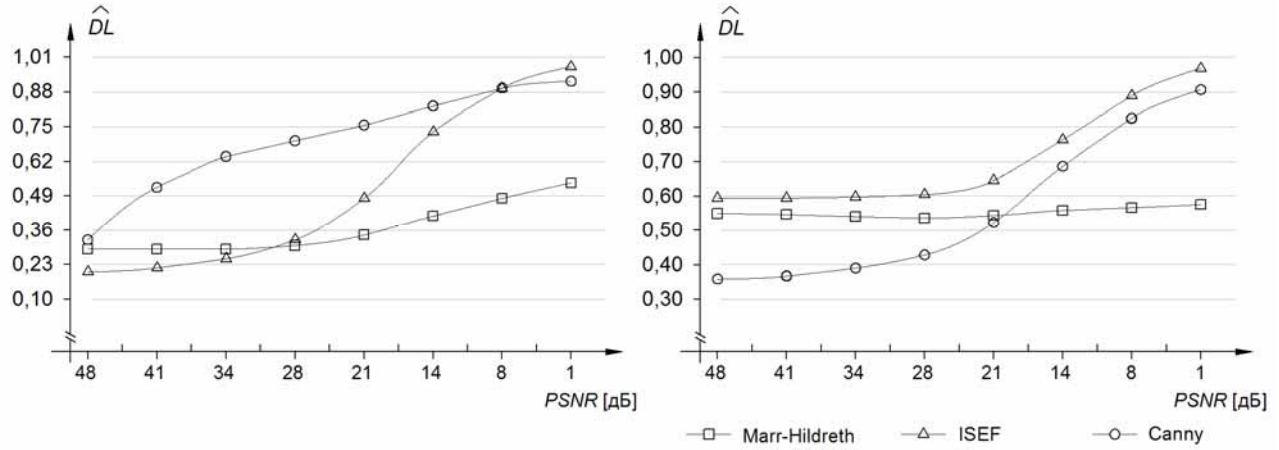


Рис. 4. Обобщённый показатель качества для морфологии типа A, F (справа)

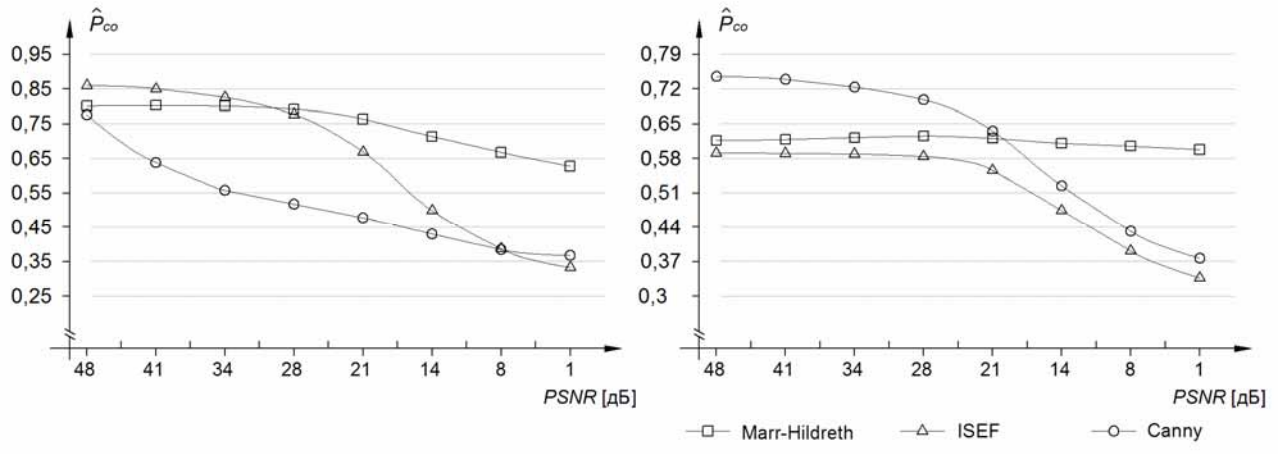


Рис. 5. P_{co} для эталонных изображений морфологии *A*, *F* (справа)

Сравнивая вероятности правильного обнаружения $\hat{P}_{co}$ для изображений, полученных на основе морфологии типа *F*, видно, что реализация алгоритма ISEF даёт наихудшие результаты на всём промежутке отношений сигнал/шум. Оператор Canny значительно превосходит оператор Marr-Hildreth при отношениях сигнал/шум больших 20 дБ, а при отношениях сигнал/шум > 18 дБ он сопоставим с оператором ISEF.

На рис. 6 приведены оценки вероятности пропуска границы. Расчёт значений P_{nd} производился по формуле [15]

$$\hat{P}_{nd} = \frac{FN}{\max\{N_I, N_B\}}. \quad (3)$$

Сравнивая вероятности пропуска границы $\hat{P}_{nd}$ для изображений, полученных на основе морфологии типа *A*, видно, что алгоритм Canny даёт наихудшие результаты практически на всём промежутке отношений сигнал/шум. Алгоритм Marr-Hildreth при отношениях сигнал/шум больших 30 дБ допускает меньшее количество ошибок первого рода, чем Canny, но качественно уступает оператору ISEF. В случае морфологии типа *F*, на промежутке отношений сигнал/шум больших 20 дБ алгоритм ISEF работает лучше, чем Canny, а в свою очередь алгоритм Canny показывает более хорошие результаты, чем алгоритм Marr-Hildreth. При отношениях сигнал/шум < 16 дБ алгоритм Canny дает наименьшую вероятность пропуска границы.

Оценки вероятностей ложных тревог ($\hat{P}_{fa}$, ошибки второго рода) были рассчитаны по формуле [15]

$$\hat{P}_{fa} = \frac{FP}{\max\{N_I, N_B\}}. \quad (4)$$

Результаты расчета соответственно для морфологий типа *A* и *F* представлены на рис. 7. Видно, что алгоритм Canny практически на всём промежутке отношений сигнал/шум даёт наихудшие результаты. Алгоритм ISEF при отношениях сигнал/шум больших 30 дБ допускает самое малое количество ошибок второго рода, а при отношениях сигнал/шум меньших 30 дБ уже самым эффективным является оператор Marr-Hildreth.

Анализируя вероятности ложных тревог $\hat{P}_{fa}$ для изображений, полученных на основе морфологии типа *F*, можно отметить, что реализация алгоритма ISEF даёт наихудшие результаты на всём промежутке отношений сигнал/шум. Реализация алгоритма Canny при отношениях сигнал/шум больших 22 дБ допускает меньшее количество ошибок второго рода, чем реализация алгоритма Marr-Hildreth.

На практике нередко возникают вопросы, связанные с качеством детектирования отдельных элементов РКП или их определённых комбинаций. В качестве примера на рис. 8 приведены оценки вероятности правильного обнаружения 170-го элемента алфавита морфологии типа *A* и 85-го элемента алфавита морфологии типа *F*, рассчитанные на программном комплексе «КИМ СП» [18].

Возможен и более детальный анализ поведения реализации исследуемых алгоритмов. Например, на рис. 9 приведены графики зависимостей величины отношения ошибок детектирования первого рода ЭПВС, созданных на основе морфологии *F*, к аналогичной ошибке детектирования ЭПВС морфологии *A* от уровня *PSNR*.

Из данных графиков видно, что реализации алгоритмов детектирования по-разному выделяют горизонтальные/вертикальные и диагональные участки границ. Например, алгоритм Canny в 1,5 раза лучше проводит локализацию диагональных элементов. Причём максимум оценки получен при отношениях сигнал/шум равных 31 дБ. С другой стороны, реализация алгоритма ISEF детектирует горизонтальные и вертикальные элементы растрового контурного поля морфологии *A* в 2,9 раза лучше, чем элементы РКП морфологии *F*. Максимум оценки приходится на 48 дБ.

На рис. 10 приведены результаты детектирования подобных элементов (17-й и 68-й элементы алфавита морфологии типа *F*). Из графиков видно, что оба элемента морфологии первой группы [18] детектируются в целом соразмерно. Разброс значений отношения вероятностей пропуска границы для различных реализаций операторов поиска и локализации границ лежит в интервале 6 %.

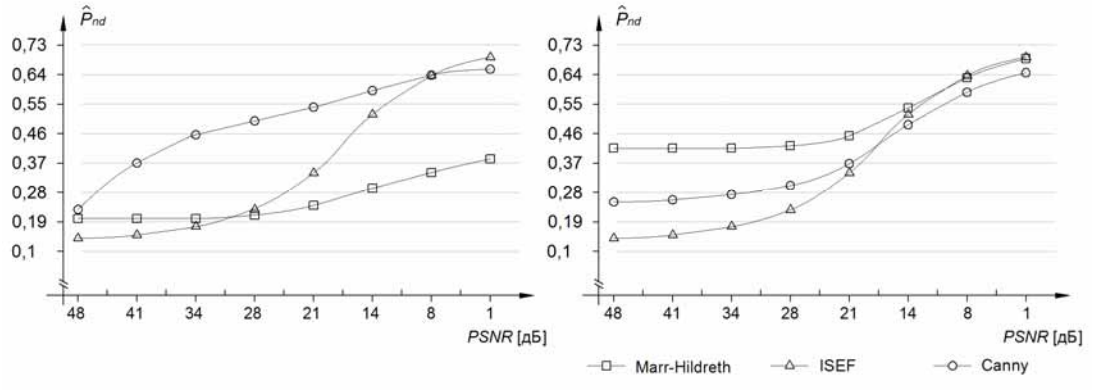


Рис. 6. P_{nd} для эталонных изображений морфологии A, F (справа)

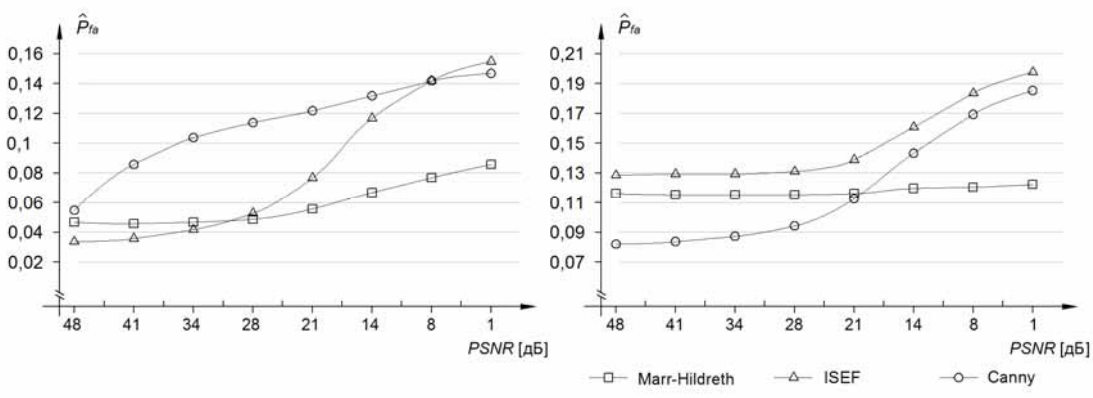


Рис. 7. P_{fa} для эталонных изображений морфологии A, F (справа)

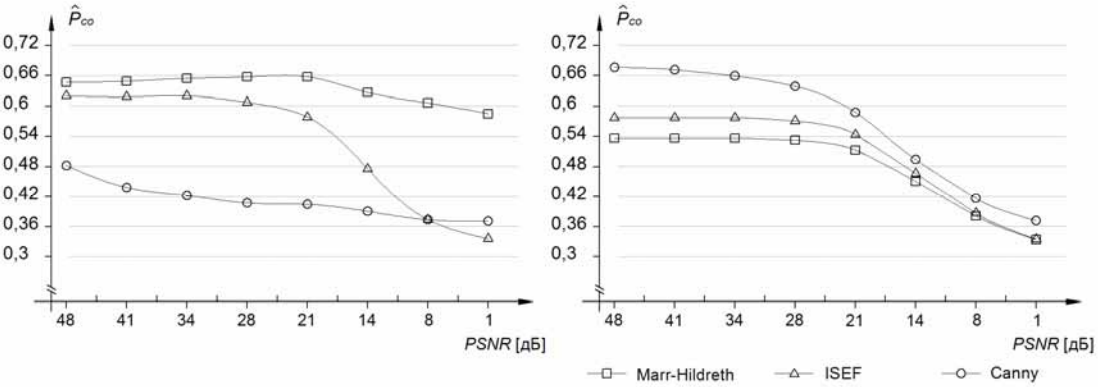


Рис. 8. P_{co} для элементов 170 морфологии A и 85 морфологии F (справа)

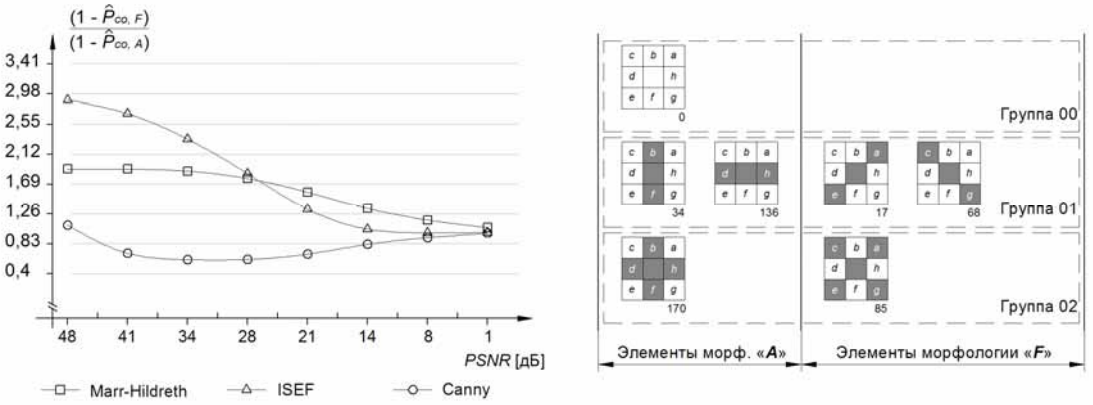


Рис. 9. Отношение оценок вероятностей пропуска границы для морфологий A и F

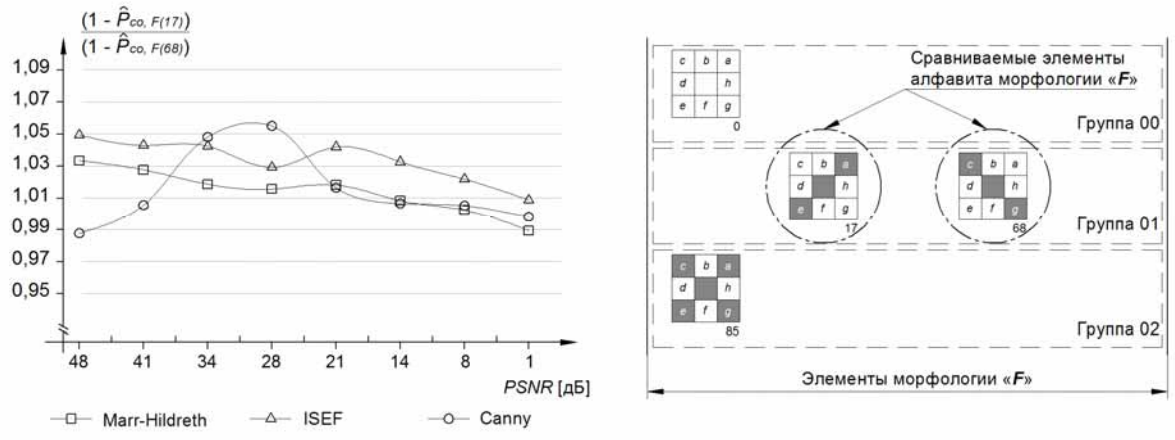


Рис. 10. Отношение оценок вероятностей пропуска границы для морфологий *F* (элемент 17 и элемент 68)

Дальнейшие исследования связаны с оценками качества детектирования границ для других разновидностей морфологий (*B*, *C*, *D*, *E*, *FB*, *FC*, *FD*, *FE*), для малоконтрастных реализаций ЭПВС, а также для различных типов границ. Интерес представляет зависимость оценки качества локализации от входных параметров контурных детекторов для различных отношений сигнал/шум и оценка чувствительности контурных детекторов.

Заключение. Таким образом, полученные результаты численных экспериментов на программно-алгоритмическом комплексе «КИМ СП» показали, что метод, предложенный в [15], может быть использован для объективной оценки качества алгоритмов поиска и локализации границ. Проведенные исследования на примере трех известных алгоритмов детектирования (Marr-Hildreth, ISEF, Canny) по данному методу позволили выделить области предпочтения каждого из алгоритмов в зависимости от отношения сигнал/ шум и типа морфологии, лежащей в основе построения изображения.

Существует, на наш взгляд, и ряд недостатков метода, основным из которых является попытка использования метрики Пратта для оценки вероятности обнаружения границ, что приводит к статистической зависимости отдельных метрик в обобщенном показателе качества *DL*. Также имеется сложность интерпретации полученных результатов с точки зрения требований функциональной эффективности проектируемой системы.

С целью проведения дальнейших исследований будет проведена доработка специального математического и программного обеспечения комплекса «КИМ СП» для принятия рациональных решений на основе экспертных оценок и оптимизации обработки информации.

Библиографические ссылки

1. G. Liu, R. Haralick Optimal matching problem in detection and recognition performance evaluation // Journal of the Pattern Recognition Society. 2002. Vol. 35. P. 2125–2139.

2. Kanga C., Wang W. A novel edge detection method based on the maximizing objective function // Journal of the Pattern Recognition Society. 2007. Vol. 40. P. 609–618.

3. Generation of fuzzy edge images using trapezoidal membership functions / C. Lopez-Molina [et al.]. France : Atlantis Publisher, 2011. P. 327–333.

4. Лаевский В. Е. Методика субоптимальной оценки работы алгоритмов получения контурного рисунка изображений // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314, № 5. С. 126–131.

5. Лаевский В. Е., Денисов В. П., Дубинин Д. В. Имитационное моделирование: Исследование алгоритмов оконтуривания объектов в изображениях. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 123 с.

6. Дубинин Д. В., Лаевский В. Е., Кочегуров А. И. Оценка качества алгоритмов оконтуривания объектов на изображениях, аппроксимированных однородными марковскими полями // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 5. С. 130–134.

7. Дубинин Д. В., Кочегуров А. И., Лаевский В. Е. Методика моделирования случайных яркостных полей, аппроксимированных однородными одноуровневыми марковскими цепями // Проблемы информатики. 2011. № 4(12). С. 35–40.

8. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A. Eine Methode zur Erzeugung stochastischer Helligkeits – felder durch homogene, einstufige Markoff-Ketten, tm – Technisches Messen. Oldenbourg, 2012. № 5. P. 271–276.

9. Abdou I. A., Pratt W. Quantitative Design and Evaluation of Enhancement // Thresholding Edge Detectors : Proceedings of the IEEE. 1979. Vol. 67, № 5. P. 753–763.

10. Kitchen L., Rosenfeld A. Edge Evaluation Using Local Edge Coherence // IEEE Transactions on Systems. 1981. Vol. 11, № 9. P. 597–605.

11. Venkatesh S., Kitchen L. Edge Evaluation Using Necessary Components // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1992. Vol. 54, № 1. P. 23–30.

12. Salotti M., Bellet F., Garbay C. Evaluation of Edge Detectors: Critics and Proposal // Proceed of the

ECCV Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms. 1996.

13. An efficient Method to Evaluate the Performance of Edge Detection Techniques by a two-dimensional Semi-Markov Model / D. Dubinin [et al.] // IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA 2014). USA, Florida, Orlando, CICA : IEEE Press, 2014. P. 1–7, DOI 10.1109/CICA.2014. 7013248.

14. Lopez-Molina C., De Baets B., Bustince H. Quantitative error measures for edge detection // Pattern Recognition. 2013. Vol. 46, № 4. P. 1125–1139.

15. Boaventura I., Gonzaga A. Method to Evaluate the Performance of Edge Detector // SIBGRAPI 2009 : XXIInd Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. Rio de Janeiro, 2009. P. 1–3.

16. Edge detection: A statistical approach / A. Halder [et al.] // Electronics Computer Technology (ICECT) : 3rd International Conference. 2011. Vol. 2. P. 306–309.

17. Bundled Software for Simulation Modeling / D. Dubinin [et al.] // Proceedings of the International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2013). Romania, Iasi : ISSCS Press (IEEE Catalog Number: CFP13816-CDR), 2013. P. 1–4.

18. Ein stochastischer Algorithmus zur Bildgenerierung durch einen zweidimensionalen Markoff-Erneuerungsprozess / D. Dubinin [et al.] // Oldenbourg Wissenschaftsverlag. 2014. Heft 62 (1). P. 57–64.

19. Дубинин Д. В., Кочегуров А. И., Лаевский В. Е. К статистике морфологии случайных пространственно-временных сигналов, сформированных двумерным точечным потоком восстановления // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 5. С. 194–198.

20. Yates J. Contingency table involving small numbers and the χ^2 test // Royal Statistical Society. 1934. Vol. 1. P. 217–235.

21. Marr D., Hildreth E. Theory of Edge Detection // In Proceedings of the Royal Society of London. 1980. B 207. P. 187–217.

22. Shen J., Castan S. An optimal linear operator for edge detection // IEEE Proceedings of the Conference on Vision and Pattern Recognition. 1986. P. 109–114.

23. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8, № 6. P. 679–698.

References

1. Liu G. , Haralick R. Optimal matching problem in detection and recognition performance evaluation, *Journal of the Pattern Recognition Society*, 2002, Vol. 35, P. 2125–2139.

2. Kanga C., Wang W. A novel edge detection method based on the maximizing objective function. *Journal of the Pattern Recognition Society*, ELSEVIER Publ., 2007, Vol. 40, P. 609–618.

3. Lopez-Molina C. et al. Generation of fuzzy edge images using trapezoidal membership functions, France: Atlantis Publ., 2011, P. 327–333.

4. Laevski V. E. [The method of Suboptimal Estimation of Operating the Algorithms for Obtaining Pattern Outline Drawing]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* 2009, Vol. 314, No. 5, P. 126–131 (In Russ.).

5. Laevskiy V. E., Denisov V. P., Dubinin D. V. *Imitatsionnoe modelirovanie: Issledovanie algoritmov okonturivaniya ob'ektov v izobrazheniyakh* [Modellbildung und stochastische Computersimulation: Objektive Beurteilung von Edge-Detektor-Algorithmen auf Grund der Ergebnisse der Objektextraktion in 2D-stochastischen Helligkeitsfeldern]. LAP- LAMBERT Academic Publ., Saarbrücken, 2011, 123 p.

6. Dubinin D. V., Laevskiy V. E., Kochegurov A. I. [Operation quality estimation of object line pattern algorithms in images approximated by homogeneous Markov fields]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta.* 2010, Vol. 317, No. 5, P. 130–134 (In Russ.).

7. Dubinin D. V., Kochegurov A. I., Laevskiy V. E. [A Particular Method of Generating Stochastic Intensity Fields by two-dimensional Semi-Markov Model]. *Problemy informatiki*, 2011, No. 4(12), P. 35–40 (In Russ.).

8. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A. A particular method of modelling stochastic intensity fields by isotropic, one-step Markov chains. Eine Methode zur Erzeugung stochastischer Helligkeits- felder durch homogene, einstufige Markoff-Ketten. tm – Technisches Messen, Oldenbourg: Scientific Publ., 2012, No. 5, P. 271–276.

9. Abdou I. A., Pratt W. Quantitative Design and Evaluation of Enhancement. *Thresholding Edge Detectors. Proceedings of the IEEE*, 1979, Vol. 67, No. 5, P. 753–763.

10. Kitchen L., Rosenfeld A. Edge Evaluation Using Local Edge Coherence. *IEEE Transactions on Systems*, 1981, Vol. 11, No. 9, P. 597–605.

11. Venkatesh S., Kitchen L. Edge Evaluation Using Necessary Components. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing,* 1992, Vol. 54, No. 1, P. 23–30.

12. Salotti M., Bellet F., Garbay C. Evaluation of Edge Detectors: Critics and Proposal. In: Proceed of the ECCV Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms. 1996.

13. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A., Reif K. An efficient Method to Evaluate the Performance of Edge Detection Techniques by a two-dimensional Semi-Markov Model. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA 2014), USA, Florida, Orlando, CICA: IEEE Press, 2014, P. 1–7, DOI 10.1109/CICA.2014.7013248.

14. Lopez-Molina C., De Baets B., Bustince H. Quantitative error measures for edge detection. *Pattern Recognition*, 2013, Vol. 46, No. 4, P. 1125–1139.

15. Boaventura I., Gonzaga A. Method to Evaluate the Performance of Edge Detector. SIBGRAPI 2009, XXIInd Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, Rio de Janeiro, 2009, P. 1–3.

16. Halder A., Chatterjee N., Kar A., Pal S., Pramanik S. Edge detection: A statistical approach. *Electronics Computer Technology (ICECT), 2011. 3rd International Conference*, 2011, Vol. 2, P. 306–309.

17. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A., Reif K. Bundled Software for Simulation Modeling. Proceedings of the International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS 2013), Romania, Iasi: ISSCS Press (IEEE Catalog Number: CFP13816-CDR), 2013, P. 1–4.

18. Dubinin D., Geringer V., Kochegurov A., Reif K. A stochastic algorithm for generating images by a two-dimensional Semi-Markov Model. [Ein stochastischer Algorithmus zur Bildgenerierung durch einen zweidimensionalen Markoff-Erneuerungsprozess]. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, *Automatisierungs-technik,* 2014. Heft 62 (1), P. 57–64.

19. Dubinin D., Kochegurov A., Laevski V. (Geringer V.) [On the Statistics of Space-Time Signals Created by a Two-Dimensional Markov Renewal Process]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 321, No. 5, P. 194–198 (In Russ.).

20. Yates J. Contingency table involving small numbers and the χ2 test, *Royal Statistical Society*, 1934, Vol. 1, P. 217–235.

21. Marr D., Hildreth E. Theory of Edge Detection. *In Proceedings of the Royal Society of London*, B 207, 1980, P. 187–217.

22. Shen J., Castan S. An optimal linear operator for edge detection. IEEE Proceedings of the Conference on Vision and Pattern Recognition, 1986, P. 109–114.

23. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Trans. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, Vol. 8, No. 6, P. 679–698.

© Денисов В. П., Дубинин Д. В., Кочегуров А. И., Лаевский В. Е. (V. Geringer), 2015

УДК 517.55

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 310–316

ОБ ИНТЕГРАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ТИПА МЕЛЛИНА–БАРНСА РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

Т. В. Зыкова

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
E-mail: zykovatv@mail.ru

Интегралы Меллина–Барнса представляют гипергеометрические функции – самый обширный класс специальных функций. Данные интегралы применяются к вычислению групп монодромии А-гипергеометрических систем дифференциальных уравнений. Кроме того, интегралы Меллина–Барнса нашли широкое применение в теоретической физике, в частности, в задачах квантовой электродинамики. Отдельно следует подчеркнуть роль интегралов Меллина–Барнса в теории алгебраических уравнений. Представляет интерес задача исследования сходимости интегралов Меллина–Барнса в граничных точках их областей сходимости. Для интеграла Меллина–Барнса, представляющего решения алгебраических уравнений, эта задача была рассмотрена ранее. Интегральные преобразования Меллина для решения общей полиномиальной системы алгебраических уравнений исследовались в ряде современных работ, в которых прямое преобразование было вычислено с помощью линеаризации системы (замены переменной специального вида). Для системы полиномиальных уравнений специального вида доказана теорема, в которой получено интегральное представление типа Меллина–Барнса мономиальной функции вектор-решения системы с указанием множества сходимости. Доказательство состоит из двух частей. В первой части обосновывается представление функции вектор-решения интегралом типа Меллина–Барнса. Во второй части доказательства исследовано множество сходимости полученного интеграла, а именно, граничные точки области сходимости. Доказано, что ни одна граничная точка не будет принадлежать области сходимости, интеграл, представляющий решение полиномиальной системы специального вида, сходится в секториальной области.

Ключевые слова: интеграл Меллина–Барнса, алгебраическое уравнение (система), преобразование Меллина, множество сходимости, линеаризация системы.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 310–316

ABOUT INTEGRATED REPRESENTATION LIKE MELLINA–BARNSA OF THE SOLUTION OF SYSTEM OF THE POLYNOMIAL EQUATIONS OF THE SPECIAL KIND

T. V. Zykova

Siberian Federal University, Institute of Space and Informatics Technologies
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: zykovatv@mail.ru

Mellin–Barnes integrals represent hyper geometrical functions – the most extensive class of special functions. These integrals are applied to calculation of groups of a monodromy of A-hyper geometrical systems of the differential equations. Besides, Mellin–Barnes integrals found a broad application in theoretical physics, in particular, in problems of quantum electrodynamics. Separately it is necessary to emphasize a role of integrals of Mellin–Barnes in the theory of the algebraic equations. The research problem of convergence of Mellin–Barnes integrals in boundary points of their areas of convergence is of interest. For integral of Mellin–Barnes submitting solutions of the algebraic equations this task it was considered earlier. Integrated Mellin transform for the decision of the general polynomial system of the algebraic equations was investigated in a number of modern works in which direct transformation was calculated by means of linearization of system (replacement of a variable of a special look). For system of the polynomial equations of a special look the theorem in which an integrated impression like Mellin–Barnes of monomial function a solution vector of system with the indication of a set of convergence is gained is proved. The proof consists of two parts. Function representation of a solution vector in the integral like Mellin–Barnes locates in the first part. In the second part of the proof the set of convergence of the received integral, namely boundary points of area of convergence is investigated. It is proved that any boundary point won't belong to convergence area, the integral submitting the decision of polynomial system of a special look meets in sectorial area.

Keywords: Mellin–Barnes integral, algebraic equation (system), Mellin transform, set of convergence, linearization of system.

Введение. Интегралы Меллина–Барнса являются обратными преобразованиями Меллина для отношений произведений конечного числа гамма-функций в композициях с линейными функциями. Частные случаи этих интегралов впервые появились в работах Б. Римана, связанных с теорией гипергеометрических функций. Позднее Х. Меллин развил их теорию [1], а Е. Барнс разработал метод получения асимптотических разложений для разных классов функций, определяемых степенными рядами и интегралами [2]. Отдельно следует подчеркнуть роль интегралов Меллина–Барнса в теории алгебраических уравнений. Впервые такое их применение было продемонстрировано Х. Меллином в работе 1921 года [3], где были найдены интегральные формулы для решения общего алгебраического уравнения. Интегральную формулу и неполную область сходимости Меллин привел без доказательства. Полное доказательство этой формулы с указанием истинной области сходимости было предъявлено И. А. Антиповой [4].

Проблема сходимости интегралов Меллина–Барнса привлекала внимание специалистов на протяжении последнего столетия. В одномерном случае вопрос о сходимости был решен в серии статей и монографий: А. Диксон и Б. Феррар [5], Л. Слейтер [6], Г. Бейтмен и А. Эрдейи [7]. Шаги к решению этой проблемы в многомерном случае были сделаны Х. Меллином, Р. Бушманом и Х. Сриваставой [8], О. Н. Ждановым и А. К. Цихом [9]. Окончательно область сходимости многомерного интеграла Меллина–Барнса найдена М. Пассаре, А. Цихом и Л. Нильсон [10].

Представляет интерес задача исследования сходимости интегралов Меллина–Барнса в граничных точках их областей сходимости. Для интеграла Меллина–Барнса, представляющего решения алгебраических уравнений, эта задача рассмотрена в работах [11; 12]. Интегральные преобразования Меллина для решения общей системы алгебраических уравнений исследовались в ряде современных работ [13; 14], в которых прямое преобразование было вычислено с помощью линеаризации системы (замены переменной специального вида). В данной работе исследовано множество сходимости интеграла Меллина–Барнса, представляющего решение полиномиальной системы уравнений специального вида.

Преобразование Меллина мономиальной функции решения общей полиномиальной системы. Рассмотрим приведенную систему n полиномиальных уравнений:

$$y_i^{m_i} + \sum_{\lambda\in\Lambda^{(i)}} x_\lambda^{(i)} y^\lambda - 1 = 0,\ i = 1,\ \ldots,\ n \qquad (1)$$

с неизвестными $y = (y_1,\ \ldots, y_n) \in T^n$ и переменными коэффициентами $x_\lambda^{(i)}$, где $\Lambda^{(i)} \subset \mathbb{Z}_\geq^n$ – фиксированные конечные подмножества; $y^\lambda = y_1^{\lambda_1}\cdots y_n^{\lambda_n}$; $m_i \in \mathbb{Z}_+$; $i = 1,\ \ldots,\ n$. Обозначим через Λ дизъюнктное объединение множеств $\Lambda^{(i)}$, и пусть $N = \#\Lambda$ – число коэффициентов в системе (1). Множество коэффициентов этой системы пробегает векторное пространство $C^\Lambda \cong C_x^N$, в котором координаты точек $x = \left(x_\lambda^{(i)}\right)$ индексируются элементами $\lambda \in \Lambda$. В работе [15] для мономиальной функции

$$\frac{1}{y^\mu(-x)} := \frac{1}{y_1^{\mu_1}(-x)\cdots y_n^{\mu_n}(-x)},\ \mu_i > 0, \qquad (2)$$

составленной из координат $y_j(-x)$ решения системы уравнений (1), было вычислено прямое преобразование Меллина, определяемое интегралом

$$M\left[\frac{1}{y^\mu(-x)}\right](z) = \int\limits_{\mathbb{R}_+^N} \frac{1}{y^\mu(-x)} x^{z-I}\,dx, \qquad (3)$$

где $x^{z-I} = x_1^{z_1-1}\cdots x_N^{z_N-1}$, $dx = dx_1\cdots dx_N$.

Множество сходимости интеграла, представляющего функцию вектор-решения полиномиальной системы уравнений специального вида. Рассмотрим приведенную систему двух полиномиальных уравнений вида

$$y_i^{m_i} + x_i y^{\lambda^{(i)}} - 1 = 0,\quad i = 1,\ 2, \qquad (4)$$

с двумя переменными коэффициентами x_1, x_2. Обозначим через $\tilde{\Delta}$ определитель матрицы

$$\tilde{\Psi} = \begin{pmatrix} \lambda_1^{(1)} - m_1 & \lambda_1^{(2)} \\ \lambda_2^{(1)} & \lambda_2^{(2)} - m_2 \end{pmatrix}$$

и предположим, что $\tilde{\Delta} > 0$. Введем векторы $\tilde{\psi}_1^\perp = \left(\lambda_1^{(2)}, m_1 - \lambda_1^{(1)}\right)$, $\tilde{\psi}_2^\perp = \left(m_2 - \lambda_2^{(2)}, \lambda_2^{(1)}\right)$, ортогональные вектор-строкам матрицы $\tilde{\Psi}$.

Теорема. Мономиальная функция $\dfrac{1}{y^\mu(-x)}$, составленная из координат решения системы (4), представляется следующим интегралом Меллина–Барнса:

$$\frac{1}{(2\pi i)^2} \int\limits_{\gamma+i\mathbb{R}^2} \prod_{i=1}^{2} \left[\frac{\Gamma\left(\dfrac{\mu_i}{m_i} + \dfrac{1}{m_i}\langle\tilde{\psi}_i, z\rangle\right)\Gamma(z_i)}{\Gamma\left(\dfrac{\mu_i}{m_i} + \dfrac{1}{m_i}\langle\psi_i, z\rangle + 1\right)}\right] \times \qquad (5)$$

$$\times\ Q(z_1, z_2) x_1^{-z_1} x_2^{-z_2}\, dz_1 dz_2,$$

где полином

$$Q(z_1, z_2) = \frac{1}{m_1 m_2} \times$$

$$\times\left(\mu_1\mu_2 + \mu_1\lambda_2^{(1)} z_1 + \mu_2\lambda_1^{(2)} z_2 - \tilde{\Delta} z_1 z_2\right),$$

а вектор $\gamma \in \mathbb{R}^2$ выбирается из открытого множества

$$U = \left\{u \in \mathbb{R}_+^2 : \mu_i + \langle\tilde{\psi}_i, u\rangle > 0,\ i = 1,\ 2\right\}. \qquad (6)$$

Множество сходимости интеграла (5) в переменных $\theta = \arg x$ определяется неравенствами

$$|\theta_i| < \frac{\pi}{m_i}\left(m_i - \lambda_i^{(i)}\right),\quad \left|\left\langle\tilde{\psi}_i^\perp, \theta\right\rangle\right| < \frac{\pi}{m_i}\tilde{\Delta},\quad i = 1,\ 2. \qquad (7)$$

Доказательство. Идея доказательства представления мономиальной функции $\frac{1}{y^{\mu}(-x)}$ интегралом (5) в секториальной области, определяемой неравенствами (7), заимствована в работе [4], поэтому первая часть доказательства излагается кратко.

1. Для простоты положим $\mu_1 = \mu_2 = 1$. Начнем с описания секториальной области голоморфности функции

$$y\left(-x(\xi)\right) = y_1\left(-x(\xi)\right) y_2\left(-x(\xi)\right), \qquad (8)$$

где зависимость $x(\xi) = \left(x_1(\xi_1,\xi_2), x_2(\xi_1,\xi_2)\right)$ определена заменой переменных (линеаризацией) в системе [15], причем ветви радикалов $W_j^{\frac{1}{m_j}}$ выбраны условием их положительности при $\xi \in \mathbb{R}_+^2$. Рассмотрим функцию $y_i\left(-x(\xi)\right) = \left(1+\xi_i\right)^{\frac{1}{m_i}}$. Она голоморфна (как многозначная функция) вне прямой $L_i = \left\{\xi \in T^2 : 1+\xi_i = 0\right\}$, где $T^2 = \left(\mathbb{C}\setminus\{0\}\right)^2$. Более того, функция $y_i\left(-x(\xi)\right)$ голоморфна (и однозначна) в секториальной области S_{τ_i} над выпуклым множеством $\tau_i = \left\{\tau \in \mathbb{R}^2 : |\tau_i| < \pi\right\}$, где $\tau_i = \arg\xi_i$, $i = 1,\ 2$.

Следовательно, функция (8) голоморфна и однозначна в секториальной области S_τ над множеством $\tau = \left\{\tau \in \mathbb{R}^2 : |\tau_i| < \pi,\ i = 1,\ 2\right\}$. Заметим, что якобиан $\frac{\partial(x)}{\partial(\xi)}$ линеаризации (в случае $n = N = 2$) обращается в нуль на множестве

$$\nabla_\xi = \left\{\xi \in T^2 : 1 + \frac{m_1 - \lambda_1^{(1)}}{m_1}\xi_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2}\xi_2 + \frac{\tilde{\Delta}}{m_1 m_2}\xi_1\xi_2 = 0\right\}$$

(см. [15]). Оно при такой замене переходит в множество ветвления алгебраической функции $y(-x)$, т. е. дискриминантное множество ∇ системы уравнений (4). Полином переменных ξ_1, ξ_2, определяющий нулевое множество якобиана ∇_ξ, имеет положительные коэффициенты у всех мономов, поэтому существует выпуклое множество $\tau' \subset \tau \subset \mathbb{R}^2$, $0 \in \tau'$, такое, что в секториальной области $S_{\tau'}$ над каждой точкой $\tau \in \tau'$ расположен ортант $e^{i\tau}\mathbb{R}_+^2 = \left\{\xi = \left(r_1 e^{i\tau_1}, r_2 e^{i\tau_2}\right) : r_j > 0\right\}$, свободный от точек ∇_ξ.

Функции $\left(1+\xi_i\right)^{\frac{1}{m_i}}$, $i = 1,\ 2$, допускают выделение ветвей (со значением 1 при $\xi_i = 0$) в секториальной области S_τ. Следовательно, таким же свойством обладает отображение $x(\xi)$ и функция (8). Кроме того, функция $y(-x)$ голоморфно продолжается в область $S_{P^o} = x\left(S_{\tau'}\right)$ – образ секториальной области $S_{\tau'} \subset \mathbb{C}_\xi^2$ при отображении $x(\xi)$. Область S_{P^o} есть секториальная область над внутренностью выпуклого многоугольника P следующего вида

$$P = \left\{\theta \in \mathbb{R}^2 : |\theta_i| \le \frac{\pi}{m_i}\left(m_i - \lambda_i^{(i)}\right),\right.$$

$$\left.\left|\left\langle \tilde{\psi}_i^{\perp}, \theta\right\rangle\right| \le \frac{\pi}{m_i}\tilde{\Delta},\ i = 1,\ 2\right\}.$$

Итак, поскольку якобиан $\frac{\partial(x)}{\partial(\xi)}$ не обращается в нуль в $S_{\tau'}$, $x(\xi)$ отображает $S_{\tau'}$ на S_{P^o} локально биголоморфно. Тем самым для $x = x(\xi) \in S_{P^o}$ функция $y(-x)$, будучи представленной как $\prod_j \left(1+\xi_j\right)^{\frac{1}{m_j}}\Big|_{\xi=\xi^{-1}(x)}$, является голоморфной. В силу односвязности S_{P^o} она голоморфна, следовательно, голоморфна функция $\frac{1}{y(-x)}$.

Для доказательства представления мономиальной функции $\frac{1}{y(-x)}$ интегралом (8) нам необходимо констатировать еще одно ее важное свойство: на множестве S_{P^o} она удовлетворяет условию $\left|\frac{1}{y(-x)}\right| = O\left(\left|x^{-a}\right|\right)$ для всех $a \in U_1$, где U_1 – открытое множество (6) при $\mu_1 = \mu_2 = 1$.

Таким образом, применяя формулу обращения для многомерного преобразования Меллина (см. [4]), получаем представление функции $\frac{1}{y(-x)}$ в виде интеграла Меллина–Барнса вида (5) в секториальной области S_{P^o}.

2. Исследуем интеграл (5) на сходимость в граничных точках области S_{P^o}. Идея доказательства подробно изложена в работе [12]. Можно оценить модуль подынтегральной функции в (5) при $|\upsilon| \to \infty$ выражением вида

$$\prod_{j=1}^{2}\left[\frac{\left(|\upsilon_j|+1\right)^{\eta_j}\left(\left|\left\langle\tilde{\psi}_j,\upsilon\right\rangle\right|+1\right)^{\xi_j}}{\left(\left|\left\langle\psi_j,\upsilon\right\rangle\right|+1\right)^{\zeta_j}}\right]\tilde{Q}(u,\upsilon)\times$$

$$\times\, exp\left\{\left\langle\upsilon,\theta\right\rangle - \frac{\pi}{2}\sum_{j=1}^{2}\left(|\upsilon_j| + \frac{|\langle\tilde{\psi}_j,\upsilon\rangle|}{m_j} - \frac{|\langle\psi_j,\upsilon\rangle|}{m_j}\right)\right\}, \quad (9)$$

где $\tilde{Q}(u,\upsilon)=|Q(z)|$, а показатели степеней определяются следующими формулами: $\eta_j = u_j - \frac{1}{2}$, $\xi_j = \frac{1}{m_j}\langle\tilde{\psi}_j, u\rangle + \frac{\mu_j}{m_j} - \frac{1}{2}$, $\zeta_j = \frac{1}{m_j}\langle\psi_j, u\rangle + \frac{\mu_j}{m_j} + \frac{1}{2}$, $j = 1, 2$.

Из вида выражения (9) следует, что сходимость интеграла (5) контролирует показатель экспоненты

$$\langle\upsilon,\theta\rangle - \frac{\pi}{2}\sum_{j=1}^{2}\left(|\upsilon_j| + \frac{|\langle\tilde{\psi}_j,\upsilon\rangle|}{m_j} - \frac{|\langle\psi_j,\upsilon\rangle|}{m_j}\right), \qquad (10)$$

степенной множитель

$$\prod_{j=1}^{2}\left[\frac{(|\upsilon_j|+1)^{\eta_j}\left(\left|\langle\tilde{\psi}_j,\upsilon\rangle\right|+1\right)^{\xi_j}}{\left(\left|\langle\psi_j,\upsilon\rangle\right|+1\right)^{\zeta_j}}\right], \qquad (11)$$

а также функция $\tilde{Q}(u,\upsilon)$, отличная от константы в случае интеграла, представляющего решение системы уравнений.

Если при фиксированном $\theta=(\theta_1,\theta_2)\in\mathbb{R}^2$ показатель экспоненты (10), зависящий от $\upsilon=(\upsilon_1,\upsilon_2)\in\mathbb{R}^2$, есть величина отрицательная, то экспоненциальный множитель (9) убывает и степенной множитель (11), и функция $\tilde{Q}(u,\upsilon)$ не могут нарушить сходимость интеграла. Эта ситуация будет иметь место при $\theta\in P^o$. Напротив, неограниченное возрастание показателя экспоненты (10) для какого-либо направления $\upsilon=(\upsilon_1,\upsilon_2)$ говорит о том, что для выбранного $\theta=(\theta_1,\theta_2)$ интеграл будет расходиться, так как степенной множитель (11) и функция $\tilde{Q}(u,\upsilon)$ не смогут «погасить» рост экспоненциального множителя.

Пусть $\theta\in\partial P$. Если матрица Ψ, составленная из показателей системы (4), не содержит нулевых элементов, то P представляет собой восьмиугольник на рис. 1. Вершины восьмиугольника P имеют координаты $K_1\left(-\pi\frac{m_1-\lambda_1^{(1)}}{m_1}, \pi\frac{m_2-\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_2\left(\pi\frac{m_1-\lambda_1^{(1)}}{m_1}, -\pi\frac{m_2-\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_3\left(-\pi\frac{\lambda_2^{(1)}}{m_2}, \pi\frac{m_2-\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_4\left(-\pi\frac{\lambda_2^{(1)}}{m_2}, \pi\frac{m_2-\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_5\left(\pi\frac{m_1-\lambda_1^{(1)}}{m_1}, -\pi\frac{\lambda_1^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_6\left(-\pi\frac{m_1-\lambda_1^{(1)}}{m_1}, \pi\frac{\lambda_1^{(2)}}{m_2}\right)$, $K_7\left(\pi\left(1-\frac{\lambda_2^{(1)}}{m_2}-\frac{\lambda_1^{(1)}}{m_1}\right), \pi\left(1-\frac{\lambda_1^{(2)}}{m_1}-\frac{\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)\right)$, $K_8\left(-\pi\left(1-\frac{\lambda_2^{(1)}}{m_2}-\frac{\lambda_1^{(1)}}{m_1}\right), -\pi\left(1-\frac{\lambda_1^{(2)}}{m_1}-\frac{\lambda_2^{(2)}}{m_2}\right)\right)$, стороны будем обозначать $[K_iK_j]$. Множество точек относительной внутренности стороны $[K_iK_j]$ будем обозначать (K_iK_j).

Он может вырождаться в шестиугольник, если один из показателей $\lambda_2^{(1)}$ или $\lambda_1^{(2)}$ равен нулю. Если $\lambda_2^{(1)}=\lambda_1^{(2)}=0$, то система (4) распадается на два уравнения, и эту ситуацию мы не рассматриваем. Проведем доказательство для случая, когда P – восьмиугольник. В других случаях оно будет аналогичным.

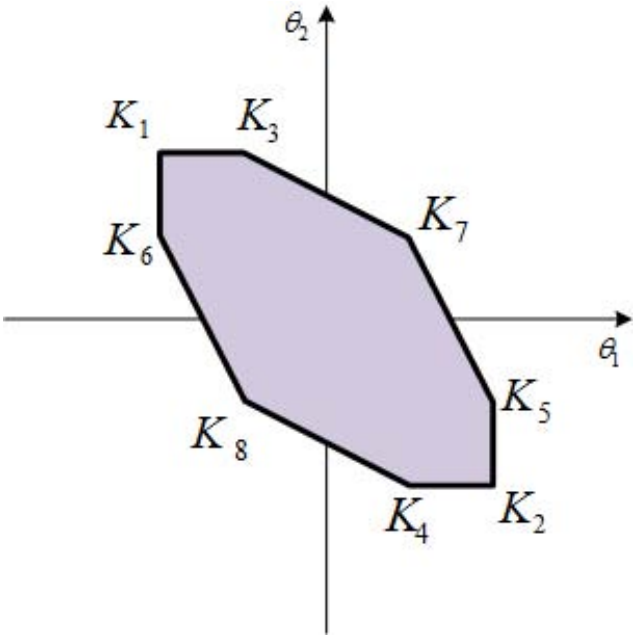


Рис. 1. Восьмиугольник P

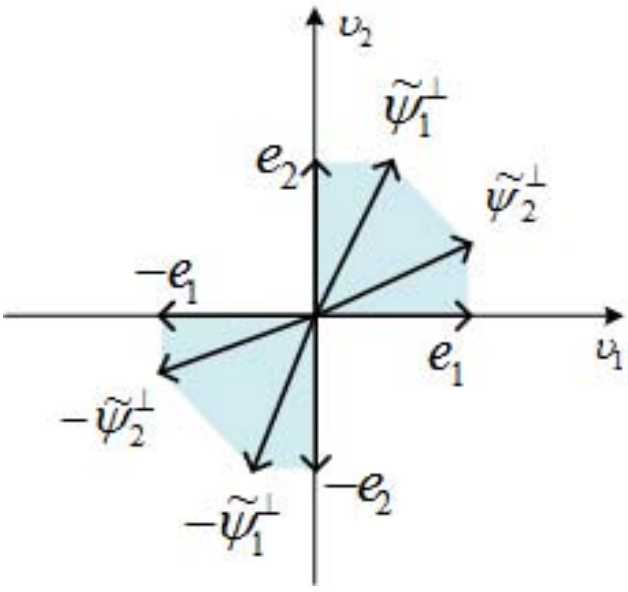


Рис. 2. Множество Σ

Как отмечалось ранее, поведение подынтегральной функции в (5) во многом зависит от размерности множества направлений υ, на которых показатель экспоненты в оценке (9) обращается в нуль при фиксированном θ. Объединение таких множеств по всем $\theta \in \partial P$ обозначим Σ. Это множество состоит из одномерных конусов $\sigma_1^{\pm}(e_i) := \left\{ re_i \in \mathbb{R}^2, r \geq 0 \right\}$, $\sigma_1^{\pm}(\tilde{\psi}_i^{\perp}) := \left\{ r\tilde{\psi}_i^{\perp} \in \mathbb{R}^2, r \geq 0 \right\}$, $j = 1, 2$ и двумерных конусов

$$\sigma_2^{\pm}(e_1, \tilde{\psi}_2^{\perp}) := \left\{ r_1 e_1 + r_2 \tilde{\psi}_2^{\perp} \in \mathbb{R}^2, r_j \geq 0 \right\},$$

$$\sigma_2^{\pm}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, e_2) := \left\{ r_1 \tilde{\psi}_1^{\perp} + r_2 e_2 \in \mathbb{R}^2, r_j \geq 0 \right\},$$

$$\sigma_2^{\pm}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, \tilde{\psi}_2^{\perp}) := \left\{ r_1 \tilde{\psi}_1^{\perp} + r_2 \tilde{\psi}_2^{\perp} \in \mathbb{R}^2, r_j \geq 0 \right\}.$$

Для случая, когда P – восьмиугольник, множество Σ изображено на рис. 2. Если $\theta \in (K_1K_3)$, то показатель экспоненты (10) обращается в нуль для всех $\upsilon \in \sigma_1^{+}(e_2)$ (и только для них). Для стороны (K_1K_6) соответствующим множеством зануления будет одномерный конус $\sigma_1^{-}(e_1)$. Для наклонных сторон (K_3K_7), (K_7K_5) показатель экспоненты (10) обращается в нуль в одномерных конусах $\sigma_1^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp})$ и $\sigma_1^{+}(\tilde{\psi}_2^{\perp})$ соответственно. Если $\theta = \left(-\pi \dfrac{m_1 - \lambda_1^{(1)}}{m_1}, \pi \dfrac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right)$ (вершина K_1), показатель экспоненты (10) обращается в нуль для всех $\upsilon \in \sigma_1^{+}(e_2) \cup \sigma_1^{-}(e_1)$. Для вершин K_3, K_7, K_5 такими конусами будут двумерные конусы $\sigma_2^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, e_2)$, $\sigma_2^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, \tilde{\psi}_2^{\perp})$, $\sigma_2^{+}(e_1, \tilde{\psi}_2^{\perp})$ соответственно. Для остальных сторон и вершин восьмиугольника картина будет симметричной (см. рис. 1, 2).

Требует детального исследования поведение интеграла (5) в окрестностях направлений $\upsilon = (\upsilon_1, \upsilon_2)$, на которых (10) обращается в нуль.

Рассмотрим сторону $[K_3K_7]$ восьмиугольника P. Для других сторон рассуждения будут аналогичны. Зафиксируем точку $\theta = (\theta_1, \theta_2) \in (K_3K_7)$. Конус $\sigma_1^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp})$ является гранью двумерного конуса $\sigma_2^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, e_2)$. Показатель экспоненты (10) для направлений υ из конуса $\sigma_2^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, e_2)$ примет вид

$$\frac{1}{\lambda_1^{(2)}} \left(\theta_2 - \pi \frac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right) \left\langle \tilde{\psi}_1, \upsilon \right\rangle,$$

причем $\dfrac{1}{\lambda_1^{(2)}} \left(\theta_2 - \pi \dfrac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right) < 0$ для $\theta_2 \in \left(\pi \left(1 - \dfrac{\lambda_1^{(2)}}{m_1} - \dfrac{\lambda_2^{(2)}}{m_2} \right), \pi \dfrac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right)$. С учетом оценки (9) исследование интеграла (5), при фиксированном $\theta \in (K_3K_7)$, сводится к исследованию сходимости следующего интеграла:

$$const \iint\limits_{\sigma_2^{+}(\tilde{\psi}_1^{\perp}, e_2)} \frac{(\upsilon_1 + 1)^{\eta_1} (\upsilon_2 + 1)^{\eta_2} \left(\dfrac{1}{m_1} \left\langle \tilde{\psi}_1, \upsilon \right\rangle + 1 \right)^{\xi_1}}{\left(\dfrac{1}{m_1} \left\langle \psi_1, \upsilon \right\rangle + 1 \right)^{\zeta_1}} \times$$

$$\times \frac{\left(-\dfrac{1}{m_2} \left\langle \tilde{\psi}_2, \upsilon \right\rangle + 1 \right)^{\xi_2}}{\left(\dfrac{1}{m_2} \left\langle \psi_2, \upsilon \right\rangle + 1 \right)^{\zeta_2}} \times$$

$$\times \tilde{Q}(u, \upsilon) exp \left\{ \left(\theta_2 - \pi \frac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right) \left\langle \tilde{\psi}_1, \upsilon \right\rangle \right\} d\upsilon_1 d\upsilon_2. \quad (12)$$

Справедлива следующая лемма.

Лемма. Интеграл (12) расходится.

Доказательство леммы. В интеграле (12) сделаем замену переменных:

$$\upsilon_1 = \omega_1, \qquad \left\langle \tilde{\psi}_1, \upsilon \right\rangle = \omega_2, \quad (13)$$

якобиан которой равен ненулевой константе. В результате такой замены интеграл (12) примет вид

$$\int\limits_{\mathbb{R}_+^2} \frac{L^{\eta_1} M^{\eta_2} \left(\dfrac{\omega_2}{m_1} + 1 \right)^{\xi_1} N^{\xi_2}}{V^{\zeta_1} R^{\zeta_2}} \times$$

$$\times \tilde{Q}_1(u, \omega) exp \left\{ \left(\theta_2 - \pi \frac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right) \omega_2 \right\} d\omega_1 d\omega_2, \quad (14)$$

где

$$L(\omega) = \omega_1 + 1, V(\omega) = \frac{\omega_2}{m_1} + \omega_1 + 1,$$

$$M(\omega) = \frac{1}{\lambda_1^{(2)}} \left(\omega_2 - (\lambda_1^{(1)} - m_1) \omega_1 \right) + 1,$$

$$N(\omega) = \frac{1}{m_2 \lambda_1^{(2)}} \left(\tilde{\Delta} \omega_1 - (\lambda_2^{(2)} - m_2) \omega_2 \right) + 1,$$

$$R(\omega) = \frac{1}{m_2 \lambda_1^{(2)}} \left(\left(m_1 m_2 - \lambda_1^{(1)} m_2 - \tilde{\Delta} \right) \omega_1 + \lambda_2^{(2)} \omega_2 \right) + 1,$$

$$\tilde{Q}_1(u, \omega) = \tilde{Q}(u_1, u_2, \omega_1, \frac{1}{m_1 - \lambda_1^{(1)}} (\omega_2 - \lambda_1^{(2)}) \omega_1).$$

Представим интеграл (14) в виде повторного:

$$\int_0^{\infty} I(\omega_2) \left(\frac{\omega_2}{m_1} + 1 \right)^{\xi_1} exp \left\{ \left(\theta_2 - \pi \frac{m_2 - \lambda_2^{(2)}}{m_2} \right) \omega_2 \right\} d\omega_2, \quad (15)$$

где

$$I(\omega_2) = \int_0^{\infty} \frac{L^{\eta_1} M^{\eta_2} N^{\xi_2}}{V^{\zeta_1} R^{\zeta_2}} \tilde{Q}_1(u, \omega) d\omega_1. \quad (16)$$

Исследуем сходимость интеграла (16). Степень подынтегральной функции по переменной ω_1 в (16) равна

$$\sum_{j=1}^{2}\left(\eta_j-\zeta_j\right)+\xi_2+2=-3-\left(\frac{1}{m_1}\langle\tilde{\psi}_1,u\rangle+\frac{\mu_1}{m_1}-\frac{1}{2}\right)+2=$$

$$=-\frac{1}{2}-\left(\frac{1}{m_1}\langle\tilde{\psi}_1,u\rangle+\frac{\mu_1}{m_1}\right)<-\frac{1}{2}. \qquad (17)$$

Здесь выражение в скобках больше нуля в силу условий (6). Степенной множитель $\tilde{Q}_1(u,\omega)$ дает существенный вклад (слагаемое, равное 2) в сумму (17), так как $degQ(z_1,z_2)=2$ при условии $\tilde{\Delta}>0$. Из неравенств (17) следует, что интеграл (16) расходится. Как следствие, расходится и интеграл (15). Лемма доказана.

Исследуем вершины восьмиугольника P. Точке K_1 соответствуют в множестве Σ два одномерных конусах $\sigma_1^+(e_2)$ и $\sigma_1^-(e_1)$. Поэтому, чтобы констатировать расходимость интеграла (5) в точке K_1, необходимо и достаточно исследовать эту точку в составе сторон $[K_1K_3]$ и $[K_1K_6]$. Аналогичным свойством обладает симметричная точка K_2.

Прообразы вершин K_3, K_7, K_5, K_4, K_8, K_6 восьмиугольника P также не входят в множество сходимости интеграла (5). Действительно, в этих точках зануление показателя экспоненты (10) происходит по всем направлениям $\upsilon=(\upsilon_1,\upsilon_2)$, принадлежащим двумерным конусам, которые были перечислены выше. Поэтому задача сводится к исследованию сходимости двойных интегралов от степенных функций по этим конусам. Эти интегралы расходятся, так как степенной множитель (11) и функция $\tilde{Q}(u,\upsilon)$ имеют суммарную степень по переменным υ_1,υ_2, равную –1.

Итак, мы можем сделать вывод: множество сходимости интеграла (5) есть секториальная область S_{P^o}, основание которой определяется неравенствами (7). Таким образом, теорема доказана.

Заключение. В данной работе получено интегральное представление типа Меллина–Барнса мономиальной функции вектор-решения системы полиномиальных уравнений специального вида с указанием множества сходимости.

Благодарности. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований № 15-31-20008-мол_а_вед, 14-01-00283-а.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research № 15-31-20008-mol_a_ved, 14-01-00283-a.

Библиографические ссылки

1. Mellin H. R. Über die fundamentale Wichtigkeit des Satzes von Cauchy für die Theorien der Gamma und der hypergeometrischen Funktionen // Acta Soc. Sci. Fennica. 1896. Vol. 21, No. 1. P. 1–115.

2. Barnes E. W. The asymptotic expansion of integral functions defined by generalized hypergeometric series // Proc. London Math. Soc. 1907. Vol. 5, No. 2. P. 59–116.

3. Mellin H. R. Résolution de l'équation algébrique générale à l'aide de la fonction gamma // C. R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math. 1921. Vol. 172. P. 658–661.

4. Antipova I. A. Inversion of many-dimensional Mellin transforms and solutions of algebraic equations // Sb. Math. 2007. Vol. 198, No. 4. P. 447–463.

5. Dixon A. L., Ferrar W. L. A class of discontinuous integrals // The Quarterly Journal of Mathematics (Oxford Series). 1936. Vol. 7. P. 81–96.

6. Slater L. J. Generalized Hypergeometric Functions. Cambridge University Press, 1966. 143 p.

7. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. М. : Наука, 1973. 294 с.

8. Buschman R., Srivastava H. Convergence regions for some multiple Mellin-Barnes contour integrals representing generalized hypergeometric functions // Internat. J. Math. Ed. Sci. Tech. 1986. Vol. 17, No. 5. P. 605–609.

9. Zhdanov O. N., Tsikh A. K. Studying the multiple Mellin-Barnes integrals by means of multidimensional residues // Sib. Math. J. 1998. Vol. 39, No. 2. P. 245–260.

10. Nilsson L. Amoebas, Discriminants, and Hypergeometric Functions // Doctoral Thesis, Department of Mathematics. Sweden : Stockholm University, 2009.

11. Антипова И. А., Зыкова Т. В. О множестве сходимости интеграла Меллина–Барнса, представляющего решения тетраномиального алгебраического уравнения // Журн. СФУ. Сер. «Матем. и физ.». 2010. Т. 3, № 4. С. 475–486.

12. Зыкова Т. В. О сходимости интеграла Меллина–Барнса на границе его области сходимости // Вестник КемГУ. 2011. Т. 47, № 3/1. С. 199–202.

13. Антипова И. А. О мономиальной функции вектор-решения общей системы алгебраических уравнений // Вестник Красноярского госуниверситета. Серия «Физ.-мат. науки». 2005. № 1. С. 106–111.

14. Степаненко В. А. О решении системы *n* алгебраических уравнений от *n* неизвестных с помощью гипергеометрических функций // Вестник Красноярского госуниверситета. Серия «Физ.-мат. науки». 2003. № 2. С. 35–48.

15. Antipova I. A., Zykova T. V. Mellin transform for monomial functions of the solution to the general polynomial system // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2013. Vol. 6, No. 2. P. 150–156.

References

1. Mellin H. R. Über die fundamentale Wichtigkeit des Satzes von Cauchy für die Theorien der Gamma und der hypergeometrischen Funktionen. *Acta Soc. Sci. Fennica.* 1896, Vol. 21, No. 1, P. 1–115.

2. Barnes E. W. The asymptotic expansion of integral functions defined by generalized hypergeometric series. Proc. London Math. Soc. 1907, Vol. 5, No. 2, P. 59–116.

3. Mellin H. R. Résolution de l'équation algébrique générale à l'aide de la fonction gamma. *C.R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math.* 1921, Vol. 172, P. 658–661.

4. Antipova I. A. Inversion of many-dimensional Mellin transforms and solutions of algebraic equations. *Sb. Math.* 2007, Vol. 198, No. 4, P. 447–463.

5. Dixon A. L., Ferrar W. L. A class of discontinuous integrals. *The Quarterly Journal of Mathematics (Oxford Series)*. 1936, Vol. 7, P. 81–96.

6. Slater L. J. Generalized Hypergeometric Functions. Cambridge University Press. 1966, 143 p.

7. Beytmen G., Erdeyi A. *Vyshii transtsendentnye funktsii* [The highest transcendental functions]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 294 p.

8. Buschman R., Srivastava H. Convergence regions for some multiple Mellin-Barnes contour integrals representing generalized hypergeometric functions. *Internat. J. Math. Ed. Sci. Tech*. 1986, Vol. 17, No. 5, P. 605–609.

9. Zhdanov O. N., Tsikh A. K. Studying the multiple Mellin-Barnes integrals by means of multidimensional residues. *Sib. Math. J*. 1998, Vol. 39, No. 2, P. 245–260.

10. Nilsson L. Amoebas, Discriminants, and Hypergeometric Functions. Doctoral Thesis, Department of Mathematics. Stockholm University. Sweden. 2009.

11. Antipova I. A., Zykova T. V. [On the Set of Convergence for Mellin-Barnes Integral Representing Solutions to the Tetranomial Algebraic Equation]. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo universiteta. Seriya matematika & fizika*. 2010, Vol. 3, No. 4, P. 475–486 (In Russ.).

12. Zykova T. V. [About convergence of Mellin-Barnes integral on border of his area of convergence]. *Vestnik KemGU*. 2011, Vol. 47, No. 3/1, P. 199–202 (In Russ.).

13. Antipova I. A. [About monomial function solution vector of the general system of the algebraic equations]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosuniversiteta. Seriya fiz.-mat. nauki*. 2005, No. 1, P. 106–111 (In Russ.).

14. Stepanenko V. A. [About the solution of system of the algebraic equations from unknown by means of hyper geometrical functions]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosuniversiteta. Seriya fiz.-mat. nauki*. 2003, No. 2, P. 35–48 (In Russ.).

15. Antipova I. A., Zykova T. V. Mellin transform for monomial functions of the solution to the general polynomial system. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2013, Vol. 6, No. 2, P. 150–156.

© Зыкова Т. В., 2015

UDC 519.6

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 317–325

GREEDY HEURISTIC METHOD FOR LOCATION PROBLEMS

L. A. Kazakovtsev*, A. N. Antamoshkin

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: levk@bk.ru

Authors consider multi-source location problems, k-means, k-median and k-medoid. Such problems are popular models in logistics (optimal location of factories, warehouses, transportation hubs etc.) and cluster analysis, approximation theory, estimation theory, image recognition. Various distance metrics and gauges allow using these models for clustering various kinds of data: continuous and discrete numeric data, Boolean vectors, documents. Wide area of application of such problems leads to growing interest of researchers in Russia and worldwide. In this paper, the authors propose a new heuristic method for solving such problems which can be used as a standalone local search method (local search multi-start) or as the main part of a new algorithm based on ideas of the probability changing method. For the parameters self-tuning of such algorithm, the authors propose new meta-heuristic which allows using new algorithm without learning specific features of each solved problem. Algorithms were tested on various data sets of size up to 160000 data vectors from the UCI repository and real data of semiconductor devices examination. For testing purposes, various distance metrics were used. Computational experiments showed the high efficiency of new algorithms in comparison with local search methods used traditionally for the considered problems. In addition, results were compared with the evolutionary methods and a deterministic algorithm based on the Information Bottleneck Clustering method. Such comparison illustrated the ability of new algorithms to reach higher preciseness of the results in reasonable time.

Keywords: p-median, k-medoid, k-means, Information Bottleneck Clustering.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 317–325

МЕТОД ЖАДНЫХ ЭВРИСТИК ДЛЯ ЗАДАЧ РАЗМЕЩЕНИЯ

Л. А. Казаковцев*, А. Н. Антамошкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: levk@bk.ru

Рассматриваются задачи множественного размещения – k-средних, k-медианная и задача k-медоид. Данные задачи находят широкое применение как в качестве логистических моделей оптимального размещения складов, производств, транспортных узлов и т. д., так и опосредованно – в качестве наиболее популярных моделей кластерного анализа, автоматической группировки, теории аппроксимации, теории оценивания, распознавания образов. При этом использование различных метрик расстояния или мер сходства позволяет применять данные задачи в качестве моделей автоматической группировки данных самой разнообразной природы: непрерывных и дискретных числовых данных, векторов булевых значений, документов. Широтой области применения рассматриваемых задач определяется возрастающий интерес к ним со стороны как российских, так и зарубежных исследователей. Предложен новый эвристический метод решения таких задач, который может применяться как в качестве самостоятельного алгоритма локального поиска (мультистарт локального поиска), так и в составе нового алгоритма, использующего идеи метода изменяющихся вероятностей (МИВЕР). Для автоматической настройки параметров алгоритма схемы МИВЕР предложена новая метаэвристика, позволяющая использовать разработанный алгоритм без предварительного анализа особенностей конкретной задачи. Работа алгоритмов протестирована на различных наборах данных размерностью до 160000 векторов данных. В качестве тестовых примеров использованы как типовые наборы данных из репозитория UCI, так и реальные данные отбраковочных испытаний полупроводниковых приборов. При этом были использованы различные метрики расстояния. Эксперименты показывают высокую эффективность новых алгоритмов в сравнении с традиционными для данных задач методами локального поиска. Проведено сравнение новых алгоритмов с некоторыми эволюционными алгоритмами, а также с детерминированным

алгоритмом, реализующим метод Information Bottleneck Clustering («информационного бутылочного горлышка»), показана способность новых алгоритмов достигать более высокой точности получаемых результатов за приемлемое время.

Ключевые слова: p-медианная задача, k-медоид, k-средних, метод «информационного бутылочного горлышка».

Introduction. The *k*-means problem is one of the classical problems of the continuous location theory [1–3]. The aim of this problem is searching for *k* points (cluster centers, centroids, medoids) in a *d*-dimensional space such that the sum of distances from each of given points called demand points, data vectors etc. reaches its minimum:

$$F\left(X_1,\ ...,\ X_k\right) = \\ = \arg\min_{X_1,\ ...,\ X_k \in R^d} \sum_{i-1}^{N} \min_{X \in \{X_1,\ ...,\ X_k\}} \left\|A_i - X\right\|_2^2. \quad (1)$$

Squared Euclidean distances and distance metrics based on the Euclidean norm is most commonly used as the distance gauge [1]. However, usage of the rectilinear (rectangle, Manhattan) metric [4] allows to obtain results (coordinates of each center) of the same accuracy (quantity of decimal digits) as given data vectors. In this case, value of each coordinate coincides with one of corresponding coordinates of data vectors [3; 5]. Moreover, using rectilinear metric reduces the influence of the outliers represent some non-standard data vectors or improperly measured values. Another approach leading to the results of the same accuracy as the initial data is solving *k*-medoids problem [6; 7]. In this case, searching for cluster centers (points minimizing the total distance) is performed on the set of data vectors only.

In (1), we have a problem with "classical" squared Euclidean distance. However, other metrics or gauges can be used. Let us denote the distance between *X* and *Y* as *L*(*X*, *Y*). The *k*-means problem and the *k*-medoids problem are special cases of the *p*-median (*k*-median) problem:

$$F\left(X_1,\ ...,\ X_k\right) = \\ = \arg\min_{X_1,\ ...,\ X_k \in R^d} \sum_{i-1}^{N} w_i \min_{X \in \{X_1,\ ...,\ X_k\}} L\left(A_i, X\right). \quad (2)$$

Here, $w_i > 0$ are weight coefficients. In the case of *k*-means problem, all $w_i = 1$.

The *k*-medoids problem can be stated as follows:

$$F\left(X_1,\ ...,\ X_k\right) = \arg\min_{X_1,\ ...,\ X_k \in \{A_1,\ ...,\ A_N\}} \times \\ \times \sum_{i-1}^{N} w_i \min_{X \in \{X_1,\ ...,\ X_k\}} L\left(A_i, X\right).$$

Known methods. The most commonly used algorithms for solving *k*-means problem include the ALA procedure (Alternating Location-Allocation) which repeats two simple steps:

Algorithm 1. ALA procedure.

Required: data vectors $A_1 \ldots A_N$, *k* initial cluster centers $X_1 \ldots X_k$.

1. For each center X_i, define its cluster C_i as the subset of data vectors having closest center X_i.

2. For each cluster C_i, recalculate its center X_i:

$$X_i = \arg\min_{X} \sum_{Y \in C_i} w_i L\left(X, Y\right).$$

3. Repeat from Step 1 is steps 1, 2 made any changes.

This procedure can be used for solving continuous *k*-median, *k*-means and *k*-medoids problems. In the general case of *k*-medoids problem, for calculating new cluster center, enumeration of all cluster members is needed. Faster similar local search procedures exist [8–10], however, they do not guarantee an exact solution.

The "classical" *k*-means method with squared Euclidean distances (l_2^2) has an important advantage. In this case, new cluster center recalculation is a simplest task solved in a single step. An average (weighted average) value of each coordinate in the cluster is the corresponding coordinate value of the center [1]. If *i*th cluster center $X_i = (x_{i,1}, \ldots, x_{i,d})$ is a *d*-dimensional vector and data vectors $A_j = (a_{i,1}, \ldots, a_{j,d})$, $j = \overline{1, N}$ are also *d*-dimensional vectors then new center of *i*th cluster for the *k*-median problem is [1]:

$$x'_{i,k} = \sum_{y \in C_i} w_i y_k \Big/ \sum w_i, k = \overline{1, d}.$$

If the ALA procedure runs with the rectilinear metric (l_1) then the value of each cluster center coordinate is calculated separately as median (weighted median) value of the corresponding coordinate of data vectors which are cluster members. Such procedure can be described as follows.

Algorithm 2. Calculating *i*th cluster center (median) with the l_1 metric.

1. For each $k = \overline{1, d}$:

1.1. Arrange data vectors $A_i = \left(a_{j,1},\ ...,\ a_{j,d}\right) \in C_i$ in ascending order. Denote such sequence $a'_{1,k},\ ...,\ a'_{|C_i|,k}$. Here $|C_i|$ is the power of a set.

1.2. Calculate $m = \left[|C_i| \big/ 2 \right]$. Store $x'_{i,k} = a'_{m,k}$. Here, square brackets mean integer part.

1.3. Repeat 1.

2. Return $X'_i = \left(x'_{i,1},\ ...,\ x'_{i,d}\right)$.

Except several special cases, *k*-means, *k*-medoids and *k*-median problems are *NP* hard problems requiring global search [11].

The result of the ALA procedure depends on selection of the initial centers. Usually, initial centers are selected among data vectors. The *k*-means++ procedure [12] is preferred in comparison with the chaotic selection of the initial centers. The *k*-means++ procedure guarantees accuracy $O(\log(p))$. However, such accuracy cannot be acceptable for most practically important problems. In this case, various initial centers recombination techniques are used.

Authors propose many techniques optimizing the ALA procedure: sampling [13] (solving a simplified problem on a randomly selected subset of data vectors and using the result as the initial solution for solving the

initial problem), various streaming algorithms for running on big data [14] etc.

Dependence of the ALA and other local search procedures on the given initial data embarrasses the reproducibility of the results: the same data vectors can belong to different clusters or the same cluster depending on chosen initial centers. Thus, problem of developing an algorithm resulting in precise and stable result is needed.

Perfect results of clustering and classification problems can be obtained by using the Information Bottleneck Clustering method (IBC) [15]. Running this algorithm starts with considering each data vector as a separate cluster. Then superfluous clusters are eliminated one by one unless we have k clusters. Each time, this algorithm eliminates the cluster center which gives minimal total distance increase after its elimination. Such algorithms are extremely slow [15]. Genetic algorithms with greedy heuristic [16] use the same principles. However, such algorithms developed initially for solving the k-median problems on a network are compromise methods which allow solving bigger problems. Versions of such algorithms described in article [17] can be used for solving continuous problems. The approach can be described as follows [2].

Algorithm 3. Genetic algorithm with greedy heuristic for k-median problems.

Required: Population size N_p.

1. Form (randomly with uniform distribution or using the k-means++ procedure) N_p different initial solutions $\chi_1, ..., \chi_{N_p} \subset \{\overline{1,N}\}$, $|\chi_i| = k \forall i = \overline{1,N_p}$. Each of such solutions is a subset of power k used as an initial solution of the ALA procedure. Here and after, for each of the initial solutions, the fitness function $F_{fitness}(\chi)$ is evaluated by Algorithm 4. Resulting values are stored in variables $f_1, ..., f_{N_p}$.

2. If the stop condition is reached the STOP. The result is the initial solution χ_{i^*} having the minimal corresponding value f_i. For finding the final solution, Algorithm 1 runs again.

3. Select randomly two indexes $k_1, k_2 \in \{\overline{1,N}\}$, $k_1 \neq k_2$.

4. Form an interim solution $\chi_c = \chi_{k_1} \cup \chi_{k_2}$.

5. If $|\chi_c| > k$ then go to step 7.

6. Calculate $j^* = \arg\min_{j \in \chi_c} F_{fitness}(\chi_c \{j\})$. Eliminate j^* from χ_c : $\chi_c = \chi_c \setminus \{j^*\}$. Go to step 5.

7. If $\exists i \in \{\overline{1,N_p}\} : \chi_i = \chi_c$ then go to step 2.

8. Select index $k_3 \in \{\overline{1,N_p}\}$ as follows. Select randomly two indexes $k_4, k_5 \in \{\overline{1,N}\}$. If $f_{k_4} > f_{k_5}$ then $k_3 = k_4$ else $k_3 = k_5$.

9. Replace χ_{k_3} and corresponding fitness function value: $\chi_{k_3} = \chi_c$, $f_{k_3} = F_{fitness}(\chi_c)$. Go to step 2.

Steps 5, 6 of this algorithm realize so called greedy heuristic eliminating sequentially the centers from the interim solution.

Analogous greedy heuristic was proposed in 1963 by Kuehn and Hamburger [18]. The Information Bottleneck Clustering method is based on the same principle of sequential cluster elimination [15]. Both method of Kuehn and Hamburger and the IBC method form the initial unfeasible solution as the set of all data vectors.

The fitness function can be evaluated as follows:

Algorithm 4. Calculating fitness function $F_{fitness}(\chi)$.

Required: initial solution χ.

1. Run Algorithm 1 from initial centers $\{A_i \mid i \in \chi\}$, form set $\{X_1, ..., X_p\}$ of centers.

2. Return $F_{fitness}(\chi) = \sum_{i=1}^{N} w_i \min_{j \in \{1,p\}} L(X_j, A_i)$.

Using this algorithm requires much computational resources. An alternative approach [17] is using the total distance (2) immediately as the fitness function in Algorithm 3. In this case, step 1 of Algorithm 4 is omitted. Actually, this approach solves the k-medoid problem and uses its solution as the initial centers set of the ALA procedure at the final iteration of the greedy heuristic. Such approach reduces the computational complexity, however, it reduces the accuracy.

An indisputable advantage of the Information Bottleneck Clustering method is its determinancy: this method does not use any random values, thus, each run results in the same result. In general case, if an algorithm uses random values, the precise reproduction of the results is impossible. Using the IBC method slows down the computation utterly. Thus, development of an algorithm giving sufficiently precise results is important for solving many practical problems.

In [3], authors propose a modification of the greedy heuristic used at step 6 of Algorithm 3. In this case, sets of points representing cluster centers in d-dimensional space are used as an alphabet of the genetic algorithm instead of the sets of data vector indexes. Authors call such modification Genetic Algorithm with Floating Point Alphabet. Results of the genetic algorithm, with this new heuristic are significantly more precise than the results of the modification proposed in [17] (k-problem solution, in fact). At the same time, iterations of Algorithm 3 with this heuristic can be performed faster in comparison with using Algorithm 4. Moreover, abrupt decrease of the computational complexity of step 6 of Algorithm 3 allows using this algorithm for large-scale problems: in [3], authors present results for problems up to 560000 data vectors. Such heuristic can be described as follows [3].

Algorithm 5. Greedy heuristic for the genetic algorithm with floating point alphabet used instead of steps 4–7 of Algorithm 3).

Required: set of data vectors $V = (A_1, ..., A_N) \in \mathrm{R}^d$, quantity k of clusters, two "parent" sets of centers χ_{k_1} and χ_{k_2}, parameter α.

1. Set $\chi_c = \chi_{k_1} \cup \chi_{k_2}$. Run ALA procedure from initial set of centers χ_c. Store the result to χ_c.

2. If $|\chi_c| = k$ then start the ALA procesure from the initial solution χ_c then STOP and return the result χ_c.

3. Calculate distance from each data vector to the nearest center in χ_c:

$$d_i = \min_{X \in \chi_c} L(X, A_i)\ \forall i = \overline{1, N}.$$

Form clusters around centers χ_c:

$$C_i = \arg\min_{X \in \chi_c} L(X, A_i)\ \forall i = \overline{1, N}.$$

Calculate distances from each data vector to the second closest center in set χ_c:

$$d_i = \min_{Y \in \chi_c \setminus \{C_i\}} L(Y, A_i)\ \forall i = \overline{1, N}.$$

4. For ezch center $X \in \chi_c$, calculate $\delta_X = F(\chi_c \setminus \{X\}) = \sum_{i: X \in C_i} (D_i - d_i)$.

5. Calculate $n_\delta = \max\left\{ \left[\alpha\left(|\chi_c| - k \right) \right], 1 \right\}$. Sort values δ_X in ascending order and select subset $\chi_{e\lim} = \left\{ X_1, ..., X_{n_\delta} \right\}$ of n_δ data vectors with minimal values δ_X.

6. For each $j \in \left\{ \overline{2, |\chi_{e\lim}|} \right\}$: if $\exists q \in \left\{ \overline{1, (j-1)} \right\}$: $L(X_j, X_q) < L_{\min}$ then remove X_j from set $\chi_{e\lim}$. Here, $L_{\min} = \min_{X \in \chi_c} \left\{ \max\left\{ L(X, X_j), L(X, X_q) \right\} \right\}$.

7. Store $\chi_c = \chi_c \setminus \chi_{e\lim}$.

8. Rearrange the data vectors to the closest centers:

$$C_i^* = \arg\min_{X \in \chi_c} L(X, A_i)\ \forall i = \overline{1, N}.$$

9. For each $X \in \chi_c$: if $\exists i \in \left\{ \overline{1, N} \right\}$: $C_i = X$ and $C_i^* \neq X$ then recalculate center X^* of cluster $C_X^{clust} = \left\{ A_i \mid C_i^* = X, i = \overline{1, N} \right\}$. Store $\chi_c = \left(\chi_c \setminus \left\{ X^* \right\} \right) \cup \{X\}$.

10. Go to step 2.

Here, an importan parameter α determines the part of superfluous centers eliminated in a single iteration. Autrors [3] propose value 0.2. Higher values accelerate the algorithm but reduce the preciseness. Small values lead to eliminating the centers one-by-one in accordance with Algorithm 4. In this paper, we used value 0.25.

Iterations of this heuristic combine the fast greedy heuristic [16; 17; 19] eliminating up to 20–25 % superfluous centers with an iteration of the modified ALA procedure. Algorithm 4 requires $p(k_0\text{-}k)$ runs of the ALA procedure (here, k_0 is quantity of initial centers), Algorithm 5 reduces number of iterations down to $O(\log(k_0–k))$. Moreover, each iteration does not require running the whole ALA procedure. Instead, only its separate optimized steps (location – allocation) are performed.

Obviously, if $k_0 = N$ then Algorithm 5 is similar with the Information Bottleneck Clustering: number of centers (and clusters) at the first iteration coincides with the number of data vectors. Moreoved, if $k_0 = N$ is not random. Thus, a simple deterministic algorithm can be constructed [20].

Algorithm 6. Deterministic algorithm with greedy heuristic.

Required: set of data vectors $V = (A_1, ..., A_N) \in \mathrm{R}^d$, number of clusters k, parameter α.

1. Set $\chi_c = V$.

2. Start Algorithm 5 from step 2.

Table shows somparison of results of various algorithms. This algorithm is deterministic but not very precise.

New algorithms. Deterministic Algorithm 6 is a special case of Algorithm 6 with initial value $|\chi_c| = N$. The crossover procedure of the genetic algorithm with floating point (Algorithm 5) starts from a joint interim solution $\chi_c = \chi_{k_1} \cup \chi_{k_2}$. If $k << N$ then in most cases (at least at the initial iterations of the GA), elements of the "parent" sets χ_{k_1} and χ_{k_2} do not coincide and Algorithm 5 has $|\chi_c| = 2k$ at its initial iteration. In [21; 22], authors propose various efficient modifications of the greedy heuristic for genetic algorithm with partial joining of the "parent" sets. In this case, $|\chi_c| \in \left\{ \overline{(k+1), 2k} \right\}$. The GA with recombination of fixed length subsets [10] operates sets of power k only. All listed algorithms are most efficient for different problem classes. Thus, depending on problem class, various power $|\chi_c|$ of the initial solution can be optimal.

Let us denote quantity of centers in the initial solution as $k_{init} = |\chi_c|$ and a ratio of the superfluous centers to k_{init} as

$$\beta = (k_{init} - k) / k.$$

Greedy heuristic in its original form (steps 4–7 of Algorithm 3) and modified form with floating point alphabet (Algorithm 5) can be used as a standalone method for solving the problem. An algorithm can be described as follows.

Algorithm 7. Greedy heuristic method with multistart.

Required: sed of data vectors $V = (A_1, ..., A_N) \in R^d$, number k of clusters, parameters α and β.

1. Calculate $k_{init} = k + \lceil \beta k \rceil$. Select randomly subset $\chi_c \in V$ of power k_{init}.

2. Start Algorithm 5 from step 2.

3. Check the stop conditions and repeat from step 1.

Such approach requires indicating the value of parameter β. Results given in table (see algorithm "GH") show the importance of this parameter.

Let us consider a known method of solving pseudo-Boolean optimization problems, Probability Changing Method [23–25]. The main idea of this method is selecting elements from some given set randomly in

accordance with the probability vector depending on previously aclieved results. An algorithm based on this method was proposed for solving the *p*-median problem on a network [26; 27]. However, such algorithm has very slow convergence and can be used as an aiding method for the genetic algorithm [26]. Similar algorithm can be used for approximate solution of the *k*-median problem with an arbitrary distance function [28]. Inclusion of the greedy heuristic into the Probability Changing Method leads to new efficient algorithm:

Algorithm 8. Adaptive greedy heuristic method for continuous location problems.

1. Set equal values of probabilities $p_i = 1/N$ for all $i = \overline{1, N}$. Set $\beta = 0.5$.

2. For each $j = \overline{1, N_{pop}}$ do:

2.1. Copy the probabilities $q_i = p_i$ for all $i = \overline{1, N}$. Set $\chi_c = \varnothing$. Generate randomly $r \in [0; 2)$ with uniform distribution. Calculate $k_{init} = k + \lceil \beta r k \rceil$.

2.2. While $|\chi_c| < k_{init}$ do:

2.2.1. Generate random $Q \in \left[0; \sum_{i=1}^{N} q_i\right)$ with uniform distribution. Set $S = 0$; $l = 1$.

2.2.2. While $S + q_j < Q$ do: $S = S + q_j$; $l = l + 1$; repeat 2.2.2.

2.2.3. Set $\chi_c = \chi_c \cup \{A_l\}$; set $q_l = 0$.

2.2.4. Repeat 2.2.

2.3. Copy the initial set $\xi_c = \chi_c$.

2.4. Start Algorithm 5 from step 2. Store the result $f_j = F(\chi_c)$; set $\chi_j = \chi_c$; $\beta_j = (k_{init} - k)/k$.

2.5. Next iteration 2.

3. Calculate $$\beta = \beta \sum_{j=1}^{N_{pop}} \frac{\beta_j \left(N_{pop} - n_j\right)^2}{\sum_{l=1}^{N_{pop}} \left(N_{pop} - n_j\right)^2 \sum_{l=1}^{N_{pop}} \beta_j},$$

here, n_j is the number of value f_j in an ascending sequence os these values.

If $4\beta k > N$ then set $\beta = N / 4k$.

4. Chose index *b* having minimal corresponding value f_b and index *w* having maximal f_w.

5. For each $i = \overline{1, N}$ do:

5.1. If $A_i \in \xi_b$ and $A_i \notin \xi_w$ then set $p_i = \gamma p_i$. Else if $A_i \in \xi_w$ and $A_i \notin \xi_b$ then $p_i = p_i / \gamma$.

5.2. Next iteration 5.

6. Check the stop conditions and repeat step 2.

This algorithm requires indicating values of parameters N_{pop} (population size) and γ (probability change coefficient). Small populations are enough for this algorithm. We used $N_{pop} = 9$ and $\gamma = 1{,}1$. Parameter β is adjusted with special meta-heuristic (step 3).

New algorithms and the deterministic algorithm with greedy heuristic [20] have an important feature. Many clustering problems (see for example [19]) are decomposed into series of *k*-means problems with $k = \overline{k_{\min}, k_{\max}}$ where $k_{\min} = 1$ (the whole data set is supposed to be a single cluster) and $k_{\max}$ is equal to some reasonable value. Algorithm 6 can be used for a problem with $k = k_{\max}$ and then Algorithm 5 from step 2 can be started again for obtaining other results down to $k = k_{\min}$. Thus, all results for $k = \overline{k_{\min}, k_{\max}}$ can be obtained in a single loop.

Computational results. For testing new methods, we used data sets from the UCI repository [29], real data of examination of the EEE components [19] and randomly generated points on a plane with uniform distribution. Some results are given in table. For comparison purposes, we solved the problems with Information Bottleneck Clustering method [15; 20], deterministic algorithm with greedy heuristic [20], the genetic algorithm for p-median and p-medoids problems based on recombination of fixed length subsets [10], the genetic algorithm with classical crossover procedure and the genetic algorithm with greedy heuristic and floating point alphabet for continuous p-median problem [3]. Computational tests show high efficiency of new algorithms. In many cases, new adaptive algorithm shows the best results.

In many cases, a single start of the greedy heuristic cannot be completed within the given time limit. Running time of the algorithm depends on parameter β. In such cases, table contains dashes. Problems with data sets are not solved with deterministic algorithms either due to huge amount of time needed.

The optimal value of parameter α remains an open question. Note that if $\alpha = 0.001$ then centers are eliminated from the interim solution one-by-one in accordance with the original greedy heuristic. For the deterministic algorithm with greedy heuristic [20], value $\alpha = 0.25$ guarantees faster result (not the most precise) in accordance with results obtained with $\alpha = 0.001$. In the case of stochastic algorithm, it is not easy to foresee which value leads to better result in reasonable time. As we can see in table, data vectors quantity (compare data sets MissAmerica1, BIRCH3 and examination of diodes) and metric do not determine the optimal value of this parameter. Developing a meta-heuristic algorithms adjusting this parameter seems to be promising. Adjusting parameter α with fixed value of β can be easily performed. Simultaneous adjustment of both parameters requires factor analysis for evaluating the influence of each parameter on the results. Thus, developing a co-evolutionary algorithm with two concurrent populations having different fixed values of parameter α seems to be simpler. An example of analogous algorithm with concurrent populations evolving with various bionic algorithms was proposed in [30].

Nevertheless, it is obvious that new adaptive algorithm allows to obtain better results than multiple start of the ALA procedure and multiple start of the greedy heuristic with fixed β.

Used algorithms: “ALA” is ALA procedure multistart; “GA-MIX” is genetic algorithm with fixed length subsets recombination [10]; “GA-GHFP” is genetic algorithm with greedy heuristic and floating point alphabet [3]; “GA-classic” is GA with classical recombination, “IBC” is Information Bottleneck Clustering [15; 20]; “Determ. GH” is deterministic algorithm with greedy heuristic [20]; “GH” is new Algorithm 7; “GL” is multistart of the original greedy heuristic with local search (steps 4–7 of Algorithm 3 at $\alpha = 0.001$ or steps 4–7 of Algorithm 3 with fast elimination of centers from the interim solution similar with steps 5–7 of algorithm 5 at $\alpha = 0.25$); “GH” adapt is adaptive greedy heuristic (Algorithm 8). If no result was achieved within specified time limit, the table contains a dash.

Results of various methods

Data set, number of data vectors, dimension, data type	Number of clusters k, metric, problem type	Algorithm	Time, sec.	Average result of 30 runs: total distance (2) $F(X_1, \ldots, X_k)$		Std. deviation of the result (30 runs)	
				Parameter α = 0.25	Parameter α = 0.001	Parameter α = 0.25	Parameter α = 0.001
Examination tests of diode, N = 701, d = 18, real	30, l_2^2 normed.	ALA	15		4896.913		9.41069
		GA-MIX	15		4867.103		2.13825
		GA-GHFP	15		4810.655		1.37712
		GA-classic	15		4882.609		8.51498
		IBC	989.3		4887.930		Determ.
	k-means	Determ. GH	0.02/0.9	4890.675	4888.21	Determ.	Determ.
		GH, β = 0.5	15	4855.235	4855.534	12.9294	7.6843
		GH, β = 1	15	4835.241	4825.410	4.0288	6.4184
		GH, β = 3	15	4834.817	4821.546	7.6421	5.2087
		GL β = 0.5	15	4854.183	4853.432	10.848	8.8929
		GL, β = 1	15	4839.104	4829.781	2.8491	3.1062
		GL, β = 3	15	4836.167	4820.190	4.1217	3.1191
		GH adapt.	15	4827.753	4832.583	1.3607	1.6819
BreastCancer (UCI), N = 699, d = 10, cathegories	20, Jaccard,	ALA	5		184.1		0.8725
		GA-MIX	5		172.81		0.3650
		GA-GHFP	5		172.62		0.0787
		GA-classic	5		182.98		1.0415
		IBC	370.16		Determ.		Determ.
	k-medoids	Determ. GH	0.4/0.7	175.2	175.7	Determ.	Determ.
		GH, β = 0.5	5	181.95	181.62	0.816	0.453
		GH, β = 1	5	177.10	177.77	1.108	0.513
		GH, β = 3	5	175.00	175.63	0.155	0.755
		GL β = 0.5	5	183.93	184.43	0.859	2.312
		GL, β = 1	5	181.43	181.60	3.163	1.012
		GL, β = 3	5	–	–	–	–
		GH adapt.	5	175.39	175.67	1.741	0.468
Ionosphere (UCI), N = 351, d = 10, real	20, l_1,	ALA	4		2530.40		2.117
		GA-MIX	4		2526.77		0.0257
		GA-GHFP	4		2527.00		0.0082
		GA-classic	4		2526.93		0.1302
		IBC	370.16		Determ.		Determ.
	k-means	Determ. GH	0.03/0.2	2531.03	2533.31	Determ.	Determ.
		GH, β = 0.5	4	2526.81	2526.79	0.0286	0.0222
		GH, β = 1	4	2526.85	2526.81	0.0816	0.0222
		GH, β = 3	4	2526.86	2526.92	0.0821	0.1100
		GL β = 0.5	4	2528.02	2527.83	0.4523	0.5249
		GL, β = 1	4	2528.33	2527.92	0.9843	0.7072
		GL, β = 3	4	2528.99	2529.99	1.0165	0.8595
		GH adapt.	4	2526.79	2526.79	0.0231	0.0205
BIRCH3 (UCI), N = 100000, d = 2, real	100, l_2^2,	ALA	60		$3.825 \cdot 10^{13}$		$3.060 \cdot 10^{11}$
		GA-MIX	60		$3.886 \cdot 10^{13}$		$5.155 \cdot 10^{11}$
		GA-GHFP	60		$3.751 \cdot 10^{13}$		$0.878 \cdot 10^{11}$
		GA-classic	60		–		–
		IBC	86400		–		–
	k-means	Determ. GH	86400	–	–	–	–
		GH, β = 0.5	60	$3.832 \cdot 10^{13}$	$3.735 \cdot 10^{13}$	$5.359 \cdot 10^{11}$	$0.759 \cdot 10^{11}$
		GH, β = 1	60	$3.827 \cdot 10^{13}$	–	$4.017 \cdot 10^{11}$	–
		GH, β = 3	60	–	–	–	–
		GL β = 0.5	60	–	–	–	–
		GL, β = 1	60	–	–	–	–
		GL, β = 3	60	–	–	–	–
		GH adapt.	60	$3.772 \cdot 10^{13}$	$3.722 \cdot 10^{13}$	$3.802 \cdot 10^{11}$	$0.216 \cdot 10^{11}$
MissAmerica1 (UCI), N = 6400, d = 16, real	100, l_2^2,	ALA	60		717488.7		1107.24
		GA-MIX	60		698055.6		460.62
		GA-GHFP	60		698054.5		406.42
		GA-classic	60		714946.3		685.23
		IBC	86400		–		–
	k-means	Determ. GH	93/9977	703786.4	707529.5	Determ.	Determ.
		GH, β = 0.5	60	714287.9	713244.8	499.037	2263.9
		GH, β = 1	60	705838.9	–	334.656	–
		GH, β = 3	60	709468.4	–	195.671	–
		GL β = 0.5	60	–	–	–	–
		GL, β = 1	60	–	–	–	–
		GL, β = 3	60	–	–	–	–
		GH adapt.	60	702860.8	708239.0	576.207	781.084

Completion of table

Data set, number of data vectors, dimension, data type	Number of clusters k, metric, problem type	Algorithm	Time, sec.	Average result of 30 runs: total distance (2) $F(X_1, \ldots, X_k)$		Std. deviation of the result (30 runs)	
				Parameter $\alpha = 0.25$	Parameter $\alpha = 0.001$	Parameter $\alpha = 0.25$	Parameter $\alpha = 0.001$
Generated problem, $N = 500$, $d = 2$, real	20, metric based on angular, distances, k-median	ALA	4		4461.24		25.9199
		GA-MIX	4		4509.49		14.4368
		GA-GHFP	4		4326.72		4.7587
		GA-classic	4		4392.95		79.6913
		IBC	3141		4381.34		Determ.
		Determ. GH	4.9/23.5	4377.12	4376.43	Determ.	Determ.
		GH, $\beta = 0.5$	4	4350.36	4378.30	15.1717	15.4234
		GH, $\beta = 1$	4	4333.02	4371.50	5.8614	38.5620
		GH, $\beta = 3$	4	4389.32	–	22.5053	–
		GL $\beta = 0.5$	4	4428.97	4453.65	59.4167	34.3130
		GL, $\beta = 1$	4	4379.42	4359.41	46.1732	22.5052
		GL, $\beta = 3$	4	4429.37	–	78.2398	–
		GH adapt.	4	4313.67	4309.43	3.7077	1.4427

Conclusion. The greedy heuristic method can be used as a standalone random stochastic or deterministic [20] method for solving continuous k-median, k-mean and k-medoids problems and as a recombination method in genetic algorithms [3; 19; 21]. More precise results can be achieved in appropriate time by using the modified greedy heuristic in a self-adjusting algorithm based on ideas of the probability changing method.

References

1. Farahani R. Z., Hekmatfar M. (editors). Facility Location Concepts, Models, Algorithms and Case Studies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 550 p.

2. Kazakovtsev L. A., Stupina A. A. Fast Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for p-Median and k-Means Problems. *IEEE 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St.-Petersburg, October 6–8, 2014. 2014, P. 702–706.

3. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N. Genetic Algorithm wish Fast Greedy Heuristic for Clustering and Location Problems. *Informatica*. 2014, Vol. 38, Iss. 3, P. 229–240.

4. Deza M. M., Deza E. Encyclopedya of Distances. Springer Verlag. Berlin, Heilderberg, 2009, 590 p., DOI: 10.1007/978-3-642-00234-2_1.

5. Trubin V. A. [An efficient algorithm for the Weber problem with rectilinear metric]. *Kibernetika*. 1978, Iss. 6, P. 67–70, DOI:10.1007/BF01070282/ (In Russ.).

6. Kaufman L., Rousseeuw P. J. Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1990, 342 p., DOI: 10.1002/9780470316801.ch1.

7. Park H. S., Jun C.-H. A simple and fast algorithm for K-medoids clustering. *Expert Systems with Applications*. 2009, Vol. 36, P. 3336–3341.

8. Lucasius C. B., Dane A. D., Kateman G. On K-Medoid Clustering of Large Data Sets with the Aid of a Genetic Algorithm: Background, Feasibility and Comparison. *Analytical Chimica Acta*. 1993, Vol. 282, P. 647–669, DOI: 10.1007/s10732-006-7284-z.

9. Zhang Q., Couloigner I. A New Efficient K-Medoid Algorithm for Spatial Clustering. *ICCSA 2005, LNCS*. 2005, Vol. 3482, P. 181–189, DOI: 10.1007/11424857_20.

10. Sheng W., Liu X. A Genetic K-Medoids Clustering Algorithm. *Journal of Heuristics*. 2004, Vol. 12, Iss. 6, P. 447–466, DOI: 10.1007/s10732-006-7284-z.

11. Cooper L. Location-allocation problem. *Oper. Res*. 1963, Vol. 11, P. 331–343, DOI: 10.1287/opre.11.3.331.

12. Arthur D., Vassilvitskii S. k-Means++: the Advantages of Careful Seeding. *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*. 2007, P. 1027–1035, DOI: 10.1.1.360.7427.

13. Mishra N., Oblinger D., Pitt L. Sublinear time approximate clustering. *12th SODA*. 2001, P. 439–447.

14. Ackermann M. R. et al. StreamKM: A Clustering Algorithm for Data Streams. *J. Exp. Algorithmics*. 2012, Vol. 17, Article 2.4, DOI: 10.1145/2133803.2184450/.

15. Sun Zh., Fox G., Gu W., Li Zh. A parallel clustering method combined information bottleneck theory and centroid-based clustering. *The Journal of Supercomputing*. 2014, Vol. 69, Iss. 1, P. 452–467. DOI: 10.1007/s11227-014-1174-1.

16. Alp O., Erkut E., Drezner Z. An Efficient Genetic Algorithm for the p-Median Problem. *Annals of Operations Research*. 2003, Vol. 122, Iss. 1–4, P. 21–42. DOI: 10.1023/A:1026130003508.

17. Neema M. N., Maniruzzaman K. M., Ohgai A. New Genetic Algorithms Based Approaches to Continuous p-Median Problem. *Netw. Spat. Econ*. 2011, Vol. 11, P. 83–99. DOI: 10.1007/s11067-008-9084-5.

18. Kuehn A. A., Hamburger M. J. A heuristic program for locating warehouses. *Management Science*. 1963, Vol. 9, Iss. 4, P. 643–666, DOI:10.1287/mnsc.9.4.643.

19. Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Stupina A. A., Masich I. S. [Problem of electronic components classifying]. *Vestnnik SibGAU*. 2014, No. 4(56), P. 55–61 (In Russ.).

20. Kazakovtsev L. A. [Deterministic algorithm for the k-means and k-medoids problems]. *Sistemy upravleniya I informatsionnye tekhnokogii*. 2015, No. 1(59), P. 95–99 (In Russ.).

21. Kazakovtsev L. A., Stupina A. A., Orlov V. I. [Modification of the genetic algorithm with greedy heuristic ffor continuous location and classification problems]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnokogii*. 2014, No. 2(56), P. 35–39 (In Russ.).

22. Kazakovtsev L. A., Orlov V. I., Stupina A. A., Kazakovtsev V. L. Modified Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for Continuous and Discrete p-Median Problems. *Facta Universitatis Series Mathematics and Informatics*. 2015, Vol. 30, Iss. 1, P. 89–106.

23. Antamoshkin A. N. Brainware for Searchal Pseudoboolean Optimization. *Transactions of the Tenth Prague Conference Czechoslovak Academy of Sciences Volume.* 1988, P. 203–206, DOI: 10.1007/978-94-009-3859-5_16.

24. Kazakovtsev L. A. [Parallel random search algorithm with adaptation for shared memory systems]. *Sistemy upravleniya I informatsionnye tekhnokogii*. 2012, No. 3 (49), P. 11–15 (In Russ.).

25. Kazakovtsev L. A. Random Constrained Pseudo-Boolean Optimization Algorithm for Multiprocessor Systems and Clusters. *ICUMT 2012, International Congress on Ultra-Modern Telecommunications*. IEEE Press. S-Petersburg. 2012, P. 650–656, DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459711.

26. Antamoshkin A. N., Kazakovtsev L. A. Random Search Algorithm for the *p*-Median Problem. *Informatica*, 2013, Vol. 37, Iss. 3, P. 267–278.

27. Antamoshkin A. N., Kazakovtsev L. A. [Application of the probability changing method for optimal location problems on a network]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 5(57), P. 10–19 (In Russ.).

28. Antamoshkin A. N., Kazakovtsev L. A. [Random search algorithm for the generalized Weeber problem in a discrete coordinate system]. *Informatika i systemy upravleniya*. 2013, No. 1, P. 87–98 (In Russ.).

29. Patrick M. Murphy P. M., Aha D. W. UCI Repository of Machine Learning Databases. 1994. Available at: http://www.cs.uci.edu/mlearn/mlrepository.html (accessed 02.01.2015).

30. Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S. New optimization metaheuristic based on cooperation of biology related algorithms. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 4(50), P. 92–99 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Facility Location Concepts, Models, Algorithms and Case Studies / R. Z. Farahani, M. Hekmatfar (editors). Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. 550 p.

2. Kazakovtsev L. A., Stupina A. A. Fast Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for *p*-Median and *k*-Means Problems // *IEEE 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)* (October 6–8, 2014. St.-Petersburg). 2014. P. 702–706.

3. Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N. Genetic Algorithm wish Fast Greedy Heuristic for Clustering and Location Problems // *Informatica*. 2014. Vol. 38, iss. 3. Pp. 229–240.

4. Deza M. M. and Deza E. Encyclopedya of Distances. Berlin-Heilderberg : Springer Verlag, 2009. 590 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00234-2_1.

5. Трубин В. А. Эффективный алгоритм для задачи Вебера с прямоугольной метрикой // *Кибернетика*. 1978. № 6. С. 67–70. DOI:10.1007/BF01070282/.

6. Kaufman L. and Rousseeuw P. J. Finding Groups in Data: an Introduction to Cluster Analysis. New York : John Wiley & Sons, 1990. 342 p. DOI: 10.1002/9780470316801.ch1.

7. Park H. S., Jun C.-H. A simple and fast algorithm for *K*-medoids clustering // *Expert Systems with Applications*. 2009. Vol. 36. P. 3336–3341.

8. Lucasius C. B., Dane A. D., Kateman G. On *K*-Medoid Clustering of Large Data Sets with the Aid of a Genetic Algorithm: Background, Feasibility and Comparison // *Analytical Chimica Acta*. 1993. Vol. 282. P. 647–669. DOI: 10.1007/s10732-006-7284-z.

9. Zhang Q., Couloigner I. A New Efficient K-Medoid Algorithm for Spatial Clustering // *ICCSA 2005, LNCS*. 2005. Vol. 3482. P. 181–189. DOI: 10.1007/11424857_20.

10. Sheng W., Liu X. A Genetic *K*-Medoids Clustering Algorithm // *Journal of Heuristics*. 2004. Vol. 12, iss. 6. P. 447–466. DOI: 10.1007/s10732-006-7284-z.

11. Cooper L. Location-allocation problem // *Oper. Res*. 1963. Vol. 11. P. 331–343, DOI: 10.1287/opre.11.3.331.

12. Arthur D., Vassilvitskii S. *k*-Means++: the Advantages of Careful Seeding // *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*. 2007. P. 1027–1035. DOI: 10.1.1.360.7427.

13. Mishra N., Oblinger D., Pitt L. Sublinear time approximate clustering // *12th SODA*. 2001. P. 439–447.

14. StreamKM: A Clustering Algorithm for Data Streams / M. R. Ackermann [et al.] // *J. Exp. Algorithmics*. 2012. Vol. 17. Article 2.4. DOI: 10.1145/2133803.2184450/.

15. A parallel clustering method combined information bottleneck theory and centroid-based clustering / Zh. Sun [et al.] // *The Journal of Supercomputing*. 2014. Vol. 69, iss. 1. P. 452–467. DOI: 10.1007/s11227-014-1174-1.

16. Alp O., Erkut E., Drezner Z. An Efficient Genetic Algorithm for the *p*-Median Problem // *Annals of Operations Research*. 2003. Vol. 122, iss. 1–4. P. 21–42. DOI: 10.1023/A:1026130003508.

17. Neema M. N., Maniruzzaman K. M., Ohgai A. New Genetic Algorithms Based Approaches to Continuous *p*-Median Problem // *Netw. Spat. Econ*. 2011. Vol. 11. P. 83–99. DOI: 10.1007/s11067-008-9084-5.

18. Kuehn A. A., Hamburger M. J. A heuristic program for locating warehouses // *Management Science*. 1963. Vol. 9, iss. 4. P. 643–666. DOI:10.1287/mnsc.9.4.643.

19. Задача классификации электронной компонентной базы / Л. А. Казаковцев [и др.]. // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 4(56). С. 55–61.

20. Казаковцев Л. А. Детерминированный алгоритм для задачи *k*-средних и *k*-медоид // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. № 59. С. 95–99.

21. Казаковцев Л. А., Ступина А. А., Орлов В. И. Модификация генетического алгоритма с жадной эвристикой для непрерывных задач размещения и классификации // *Системы управления и информационные технологии*. 2014. № 2(56). С. 35–39.

22. Modified Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for Continuous and Discrete p-Median Problems / L. A. Kazakovtsev [et al.] // *Facta Universitatis Series Mathematics and Informatics*. 2015. Vol. 30, iss. 1. P. 89–106.

23. Antamoshkin A. N. Brainware for Searchal Pseudoboolean Optimization // *Transactions of the Tenth Prague Conference Czechoslovak Academy of Sciences Volume*. 1988. P. 203–206. DOI: 10.1007/978-94-009-3859-5_16.

24. Казаковцев Л. А. Параллельный алгоритм случайного поиска с адаптацией для систем с распределенной памятью // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. № 3(49). С. 11–15.

25. Kazakovtsev L. A. Random Constrained Pseudo-Boolean Optimization Algorithm for Multiprocessor Systems and Clusters // *ICUMT 2012, International Congress on Ultra-Modern Telecommunications*. S-Petersburg : IEEE Press, 2012. P. 650–656. DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459711.

26. Antamoshkin A. N., Kazakovtsev L. A. Random Search Algorithm for the *p*-Median Problem // *Informatica*, 2013. Vol. 37, iss. 3. P. 267–278.

27. Антамошкин А. Н., Казаковцев Л. А. Применение метода изменяющихся вероятностей для задач размещения на сети // *Вестник СибГАУ*. 2014. № 5(57). С. 10–19.

28. Антамошкин А. Н., Казаковцев Л. А. Алгоритм случайного поиска для обобщенной задачи Вебера в дискретных координатах // *Информатика и системы управления*. 2013. № 1. С. 87–98.

29. Patrick M. Murphy P. M., Aha D. W. UCI Repository of Machine Learning Databases [Электронный ресурс]. 1994. URL: http://www.cs.uci.edu/mlearn/mlrepository.html (дата обращения: 02.01.2015).

30. Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S. New optimization metaheuristic based on co-operation of biology related algorithms // *Вестник СибГАУ*. 2013. № 4(50). С. 92–99.

© Kazakovtsev L. A., Antamoshkin A. N., 2015

УДК 621

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 326–330

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ С ПОЛНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

П. А. Кузнецов

Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82
E-mail: forubox@yandex.ru

Рассматривается надежность автоматизированных систем, вопрос эффективности повышения надежности систем путём резервирования. Действие АСУ рассматривается с точки зрения выработки какого-то продукта, в общем случае – какого-то материального результата. Изучается эффект, который приносит исправная система, затраты на реализацию резервированной системы. Фактическая постройка АСУ требует капитальных затрат (экономических ресурсов). Показывается эффект, который даёт повышение степени резервирования. Изучаются системы с полным резервированием, расход ресурсов на их реализацию. Раскрываются последствия отказов, переход систем в неисправное и опасное состояние, причинение отказами ущерба.

Выводятся формулы, определяющие зависимости эффекта от расходов на реализацию системы, ущерба от отказа системы, надежности и степени резервирования. Проводится приведение формул к зависимости от малого количества переменных. Приводятся графики, показывающие точки изменения выгодности той или иной степени резервирования, графики зависимости относительной стоимости от ущерба и относительной стоимости от относительного ущерба и надежности. На графиках показываются критические значения стоимости систем при определённых степенях резервирования, надежности и ущерба, при превышении которых экономический эффект становится отрицательным. Показывается, при каких условиях становится выгодной та или иная степень резервирования, граничные условия для определенных степеней избыточности, позволяющие проводить анализ эффективности АСУ.

Ключевые слова: надежность, избыточность, ущерб, эффективность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 326–330

ON THE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF FULLY REDUNDANT SYSTEMS

P. A. Kuznetsov

Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
E-mail: forubox@yandex.ru

The article discusses the reliability of automated systems, the question of the effectiveness of Reliability Improvement by reservation. Action ACS is considered from the point of view of production of a product, in the general case - some tangible results. The phenomenon, which brings the system reliability, the cost of implementing a redundant system, is studied. The actual construction of ACS requires capital costs (economic resources). The effect that increases the degree of redundancy is shown. We study a system with full redundancy, the consumption of resources for their implementation. We reveal the consequences of failure, the transition systems are faulty and dangerous condition caused by the failure of damage. The formula for determining the dependence of the effect on the costs of implementing the system, the damage caused by failure of the system, reliability and redundancy are shown. The above formulas to dependence on a small number of variables are carried out. The graphs showing the changes in terms profitability varying degrees of redundancy, graphs of the relative value of the damage and the relative value of the relative damage and reliability are provided. On the graph it is shown the critical values of the cost of systems with a certain degree of redundancy, reliability and damage, above which the economic effect is negative. It is shown under what conditions it becomes profitable or that the degree of redundancy, the boundary conditions to determine the degree of redundancy, allowing to analyze the effectiveness of control systems.

Keywords: reliability, redundancy, danger, damage, efficiency.

Введение. Любая система автоматизированного управления технологическим процессом неразрывно связана с самим технологическим процессом. И, следовательно, их надежность необходимо рассматривать совокупно. Рассмотрим надежность работы АСУ с точки зрения экономической эффективности на протяжении некоего времени *T*.

Известно, что результатом работы какого-либо технологического процесса является выработка какого-то продукта, в общем случае – какого-то материального результата. Основной экономический эффект от применения АСУ определяется повышением эффективности автоматизируемого производства, повышением качества и надежности управления, сопровождаемым снижением потерь, повышением производительности, снижением аритмии и т. п. [1]. И данный продукт, результат, получаемый за время *T*, можно выразить в экономическом эквиваленте. Обозначим его прибылью П.

В свою очередь, фактическая постройка АСУ требует капитальных затрат (экономических ресурсов). Система управления обладает стоимостью С.

Капитальные затраты на разработку, внедрение АСУ включают [2; 3]:

– капитальные затраты на приобретение (изготовление), транспортирование, монтаж и наладку вычислительной техники;

– затраты на строительство (реконструкцию) зданий, сооружений, необходимых для функционирования АСУ;

– изменение оборотных средств в связи с разработкой и внедрением АСУ.

Качество функционирования технических систем определяется различными показателями. И одним из таких показателей является надёжность – свойство объекта сохранять по времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. Уровень тестируемости дефекта определяется как вероятность обнаружения сбоя на случайно выбранном выходе [4–7].

Состояние, в котором не все значения параметров объекта находятся в установленных пределах, называют неисправным. И зачастую при переходе в такое состояние происходит авария. Система переходит в опасное состояние – чрезвычайное состояние, при котором возник ущерб большого масштаба [8]. Таким образом, при наступлении неисправного состояния ТП возникает потеря экономических ресурсов – ущерб У [9–11].

Вероятность пребывания ТП в исправном состоянии обозначим буквой *P*.

Система, на которую затрачены финансы в размере стоимости С, с вероятностью *P* приносит прибыль П, а с вероятностью 1–*P* ущерб У.

Получающийся экономический эффект выражается формулой

$$Э = П \cdot P - (С + У(1 - P)). \quad (1)$$

Для повышения надежности системы применяется методы повышения надежности, в частности, резервирование в его простейшем виде – полное резервирование [12; 13].

Стоимость такой резервированной системы повышается в *K* раз, и экономический эффект:

$$Э = П \cdot (1 - (1 - P)^K) - (С \cdot K + У \cdot (1 - P)^K; \quad (2)$$

$$Э = П - С \cdot K + (1 - P)^K \cdot (П + У).$$

В данном виде экономический эффект зависит от пяти переменных.

Упростим это выражение, разделив обе части на П:

$$Э_о = 1 - a_1 \cdot K - (1 - P)^K \cdot (a_2 + 1), \quad (3)$$

a_1 назовём относительной стоимостью (ОС), a_2 – относительным ущербом (ОУ).

Если относительная стоимость будет превышать единицу, если стоимость будет больше прибыли – экономический эффект в любом случае будет отрицателен [14].

Как мы видим, если слагаемые

$$-a_1 \cdot K - (1 - P)^K \cdot (a_2 + 1) \quad (4)$$

в сумме дадут больше 1, то итоговый экономический эффект будет отрицателен. И можно выяснить условия этого, зафиксировав все переменные, кроме одной.

Приравняем экономический эффект к нулю, выразим из него относительную стоимость:

$$a_1 = \frac{1 - (1 - P)^K (a_2 + 1)}{K}. \quad (5)$$

Критическая относительная стоимость. Рассмотрим, какую величину при каких значениях *P*, a_2 и *K* будет иметь критическая относительная стоимость – такая относительная стоимость, превышение которой даст отрицательный экономический эффект.

На рис. 1 показаны зависимости критической относительной стоимости от относительного ущерба при надежности системы 0,9 и отсутствии резервирования (прямая 1), одинарном резервировании (дублировании) (прямая 2) и двойном резервировании (прямая 3). Критическая a_1 одного варианта становится выше критической a_1 другого в точках пересечения прямых.

Координаты точек находятся решением соответствующих уравнений.

При надежности системы 0,9 дублирование становится выгоднее его отсутствия при относительной стоимости, меньшей 0,47, и относительном ущербе, большем 4,26.

При надежности системы 0,9 двойное резервирование становится выгоднее при относительной стоимости, меньшей 0,321, и относительном ущербе, большем 34,71.

Выражение

$$a_1 = \frac{1 - (1 - P)^K (a_2 - 1)}{K}$$

можно графически представить и в одной системе координат в виде семейства поверхностей – множества поверхностей, непрерывно зависящих от одного или нескольких параметров [15; 16]. Одной координатой будет показатель *P*, другой – a_2, а разделяющей элементы семейства – *K*.

Сначала получим функцию, показывающую зависимость значений надежности от относительного ущерба и ограничивающую область большей выгодности отсутствия резервирования:

$$1-(1-P)(a_2+1)=\frac{1-(1-P)^2(a_2+1)}{2},$$

$$P=\frac{4\pm\sqrt{4-\frac{4}{1+a_2}}}{2}.$$

Зависимость стоимости от надежности. Покажем теперь на одном графике, как зависит относительная стоимость от надежности и относительного ущерба.

Функция, представляемая на графиках

$$a_1=\frac{1-(1-P)^K(a_2-1)-Э_о}{K}.$$

Вначале приведём номограммы для значений относительной стоимости, при которой экономический эффект равен нулю, и разных степеней резервирования.

При отсутствии резервирования график будет иметь вид, представленный на рис. 2.

При дублировании график-номограмма будет иметь вид, представленный на рис. 3.

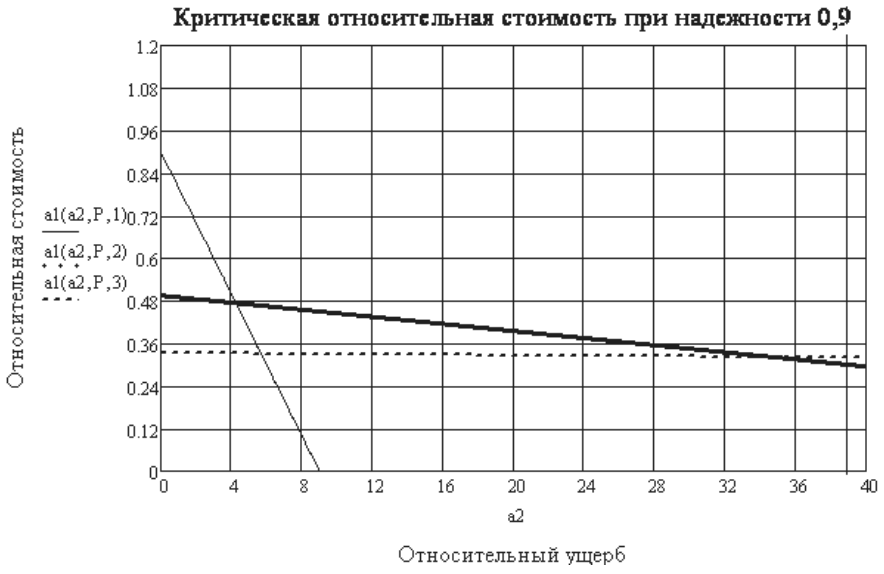


Рис. 1. Графики зависимости критической относительной стоимости от относительного ущерба при надежности одного экземпляра системы 0,9

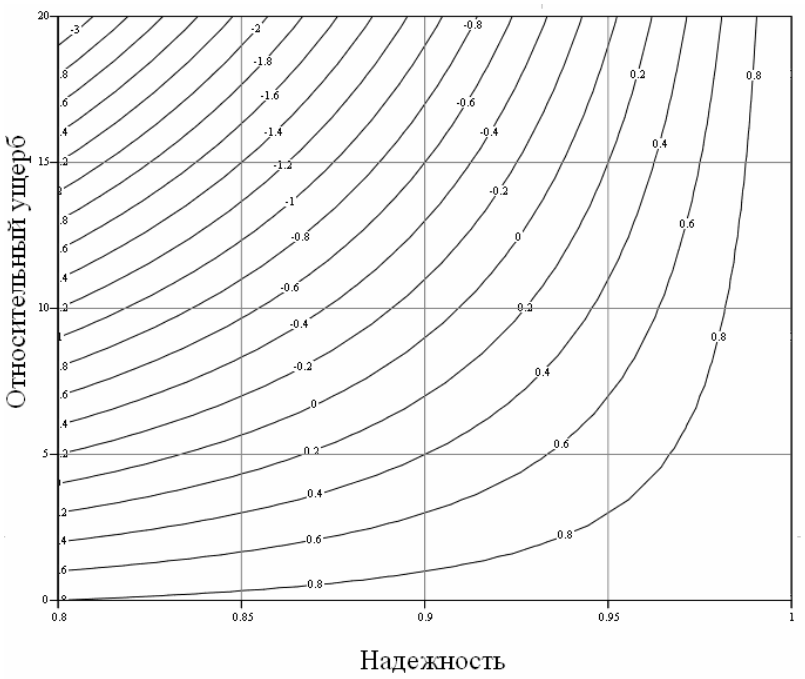


Рис. 2. Номограмма относительной стоимости при отсутствии резервирования

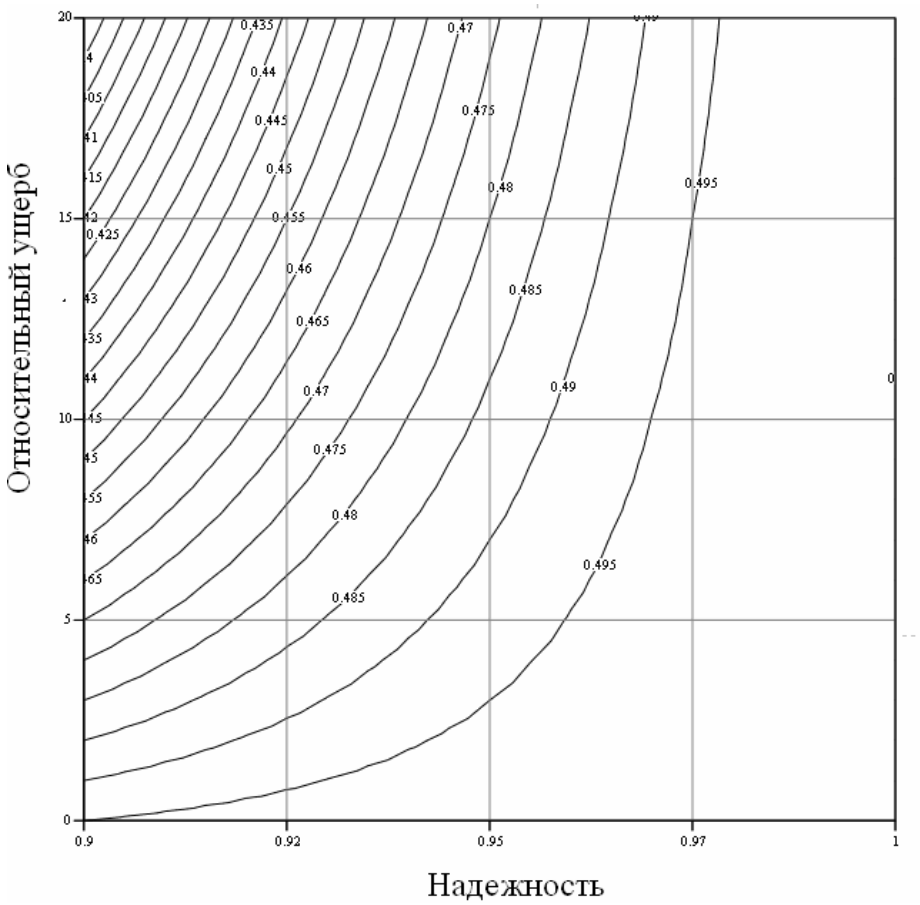


Рис. 3. Номограмма относительной стоимости при дублировании

Заключение. Анализируя все вышеприведенные выкладки и графики-номограммы, можно сделать вывод о том, что выгодность применения метода резервирования для повышения надежности АСУ ТП имеет свои весьма конкретные ограничения по стоимости создаваемой системы, надежности её элементов и ущербу, причиняемому её выходом из строя. Вычислив эти ограничивающие условия, можно проектировать надежные и одновременно эффективные системы. Приведенные графики показывают граничные условия для определенных степеней избыточности и позволяют проводить анализ эффективности АСУ.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 24.702–85. Эффективность автоматизированных систем управления. Основные положения [Электронный ресурс]. URL: http://cert.obninsk.ru/gost/554/554.html (дата обращения: 12.02.2015).

2. Пославский М. А. Экономическая эффективность автоматизации управления производством в цветной металлургии : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05. / Ин-т «Гипроникель», СПб., 2006. 176 с.

3. ГОСТ 34.602–89. Техническое задание на создание автоматизированной системы [Электронный ресурс]. URL: http://www.rgost.ru/ (дата обращения: 12.02.2015).

4. Ковалев И. В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект // Вестник СибГАУ. 2014. № 3 (55). С. 78–92.

5. Курочкин Ю. А., Смирнов А. С., Степанов В. А. Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем. Спб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1993. 320 с.

6. Модификация метода Волковича–Михалевича с целью оптимизации затрат при синтезе отказоустойчивых информационно-вычислительных систем / П. А. Кузнецов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 6(46). С. 97–100.

7. К вопросу оценки надежности АСУ с блокирующими модулями защиты / И. В. Ковалев [и др.] // Приборы. 2013. Вып. 6. С. 20–24.

8. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. 276 с.

9. ГОСТ Р 22.10.01–2001. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Оценка ущерба. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://www.rgost.ru/ (режим доступа: 12.02.2015).

10. Безопасность и надежность технических систем : учеб. пособие / Л. Н. Александровская [и др.] М. : Логос, 2004. 280 с.

11. Klyatis Lev M. Accelerated Reliability and Durability Testing Technology. New Jersey : John Wiley & Sons, 2012. 430 p.

12. Надежность технических систем : учеб. пособие для высших учебных заведений / под общ. ред. Е. В. Сугака, Н. В. Василенко. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2000. 608 с.

13. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М. : Наука, 2006. 410 с.

14. Перепеловский А. В., Черненко А. Ф. Учетно-аналитическое обеспечение хозяйственных операций по договорам пожизненной ренты и содержания : монография / Российская акад. естествознания. М. : Изд. дом Академии естествознания. 2013. 197 с.

15. Большая советская энциклопедия. М. : Советская энциклопедия. 1969–1978.

16. Ляшков А. А., Завьялов А. М. Семейство поверхностей, заданное формулами преобразования координат, и его огибающая // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1. 8 с.

References

1. *GOST 24.702–85. Effektivnost' avtomatizirovannykh sistem upravleniya. Osnovnye polozheniya* [State Standard 24.702-85. The effectiveness of the automated control systems. Fundamentals] Available at: http://cert.obninsk.ru/gost/554/554.html (accessed 12.02.2015).

2. Poslavskiy M. A. *Ekonomicheskaya effektivnost' avtomatizatsii upravleniya proizvodstvom v tsvetnoy metallurgii. Diss. kand. ek. nauk* [Cost-effectiveness of automation of production in ferrous metallurgy. PhD econom.sci.diss] St.Petersburg, Gipronikel' Institute Publ, 2006, 176 p.

3. *GOST 34.602–89. Tekhnicheskoe zadanie na sozdanie avtomatizirovannoy sistemy* [State Standard 34.602-89. Terms of Reference for the creation of an automated system] (in Russ.) Available at: http://www.rugost.com/index.php?option=com_content&view=article&id=96:gost-34602-89&catid=22:34&Itemid=53 (accessed 12.02.2015).

4. Kovalev I. V. [Analysis of the problems in the study of the reliability of the software: multi-stage and architectural aspects]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 3(55), P. 78–92 (In Russ.).

5. Kurochkin Yu. A., Smirnov A. S., Stepanov V. A. *Nadezhnost' i diagnostirovanie tsifrovykh ustroystv i sistem* [Reliability and diagnostics of digital systems]. St. Petersburg. St. Petersburg University Publ., 1993, 320 p.

6. Kuznetsov P. A., Beschastnaya N. A., Bakhmareva K. K., Antamoshkin O. A., Antamoshkin A. N. [Modification of the Volkovich`s-Michalevi`c method to optimize costs in the synthesis of fault-tolerant information systems]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 6(46), P. 97–100 (In Russ.).

7. Kovalev I. V., Kuznetsov P. A., Zelenkov P. V., Shaydurov V. V., Bakhmareva K. K. [To the question of the reliability of automated control systems with blocking protection modules]. *Pribory*. 2013, Vol. 6. P. 20–24 (In Russ.).

8. Ryabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and safety of structural complex systems]. St. Petersburg, St. Petersburg University Publ., 2007, 276 p.

9. *GOST R 22.10.01–2001. Bezopasnost' v chrezvychaynykh situatsiyakh. Otsenka ushcherba. Terminy i opredeleniya* [State Standart R 22.10.01-200. Safety in emergencies. Damage assessment. Terms and definitions]. Available at: http://vsegost.com/Catalog/64/6474.shtml (accessed 12.02.2015).

10. Aleksandrovskaya L. N., Aronov I. Z., Kruglov V. I., Kuznetsov A. G., Patrakov N. N., Sholom A. M. *Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie* [Safety and reliability of technical systems. Study guide]. Moscow, Logos Publ., 2004, 280 p.

11. Lev M. Klyatis. Accelerated Reliability and Durability Testing Technology. New Jersey. John Wiley & Sons, 2012, 430 p.

12. Sugak E. V, Vasilenko N. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem. Uchebnoe posobie dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [Reliability of technical systems. Study guide]. Krasnoyarsk, NII SUVPT Publ., 2000, 608 p.

13. Okhtilev M. Yu. Sokolov B. V. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov* [Intelligent technologies for monitoring and management of the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 410 p.

14. Perepelovskiy A. V., Chernenko A. F. *Uchetno-analiticheskoe obespechenie khozyaystvennykh operatsiy po dogovoram pozhiznennoy renty i soderzhaniya* [Accounting and analytical support for business operations on the life annuity contract and content]. Moscow, Akademiya estestvoznaniya Publ., 2013. 197 p.

15. *Bol'shaya sovetskaya entsiklopediya* [The Great Soviet Encyclopedia]. Moscow, Soviet entsiklopediya Publ., 1969–1978.

16. Lyashkov A. A., Zav'yalov A. M. [Family of surfaces is given by the coordinate transformation, and its envelope]. *Inzhenernyy vestnik Dona.* 2013, Vol. 1, 8 p. (In Russ.).

© Кузнецов П. А., 2015

УДК 519.866:621.039.514.25

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 331–337

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ОБЪЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ СРЕДЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ DELPHI

Л. Л. Латушкина

Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27
E-mail: Latush2003@mail.ru

Рассматриваются материалы по созданию программной разработки для выполнения анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы. Цель разработки – проанализировать динамическую устойчивость электропередачи простейшей электрической системы при появлении симметричных коротких замыканий (КЗ) на воздушной линии, а также рассмотреть изменения устойчивости при варьировании мощности нагрузки в заданной схеме, изменении длины воздушной линии и изменении конфигурации схемы с двумя трансформаторами на схему с одним трансформатором. Решение задачи анализа динамической устойчивости электроэнергетической системы осуществляется в объектно ориентированной среде программирования Delphi. Также дана оценка существующих программ по расчету динамической устойчивости электрических схем, рассмотрена возможность их применения для решения поставленной задачи. Рассмотрены постановка и условие задачи по оценке динамической устойчивости простейшей электрической системы, коротко рассмотрена методика определения угла предельного отключения генератора, показана реализация поставленной задачи, рассмотрен принцип работы созданного приложения, а также основные рабочие окна, работа с ними и сделаны выводы по работе. Планируется расширение программы: применение её к расчету по оценке динамической устойчивости при несимметричных коротких замыканиях в воздушной линии.

Ключевые слова: программа, Delphi, динамическая устойчивость.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 331–337

ASSESSMENT OF DYNAMIC STABILITY OF A SIMPLE POWER SYSTEM IN AN OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING ENVIRONMENT DELPHI

L. L. Latushkina

Khakassia Technical Institute, branch of Siberian Federal University
27, Shchetinkina Str., Abakan, 655017, Russian Federation
E-mail: Latush2003@mail.ru

This article discusses the materials for creating a software development for analysis of dynamic stability of a simple adjustable electrical system. The aim of development is to assess the dynamic stability of power transmission the simplest electrical system by the appearance of symmetrical short circuit (SC) on the air line, as well as to consider changes resistance with the variation of load power in a given schema, the change in long air line and change the configuration schema with two transformers one transformer. The solution of the problem of analysis of dynamic stability of power system is implemented in an object-oriented programming environment Delphi. The article also provides an assessment of existing programs for the calculation of dynamic stability of electric circuits, the possibility of their application for solving the task. The article deals with the formulation and condition assessment objectives dynamic stability of the simplest electrical system, briefly considered the method of determining the angle limit disable the generator, shows the implementation of the tasks and the working principle of the application, the main working window, work with them and the conclusions. We plan to expand the program: its application to the calculation of the assessment of dynamic stability with asymmetrical short circuits in the power lines.

Keywords: software, Delphi, dynamic stability.

Введение. Возникновение токов коротких замыканий возможно в любой электроэнергетической системе. Электромеханические переходные процессы, возникающие при этом, относятся к вопросам динамики электроэнергетической системы, оценка поведения которой требует выработки мероприятий по улучшению

её устойчивости. Достоверный анализ устойчивости может быть получен посредством применения информационных технологий, созданных на основе современных языков программирования.

Постановка задачи для программной разработки. Необходимость оценки динамической устойчивости систем полезна в учебно-научной деятельности студентов [1–4]. Тема анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы относится к дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» [5; 6]. Для проведения студентами анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы в 1998 г. была написана программа на языке Pascal [7]. Но прогресс не стоит на месте, поэтому, когда в компьютерных классах сменили OS Windows XP на Windows 8, программа оказалась неработоспособной и встала необходимость в другой программе для анализа динамической устойчивости простейшей схемы.

Требования к программе: простота и понятность интерфейса, возможность внесения различных данных и изменений, дешевизна и доступность программы, программа должна работать в условиях локальной сети в компьютерных классах, выполнять оценку динамической устойчивости системы простейшей электрической сети [8].

В практической деятельности инженера интерес представляет наглядная картина процесса, где бы пользователь мог находить угол предельного отключения сам, видя площади ускорения и торможения при введении любого угла отключения и ориентируясь на полученную картинку, мог бы делать изменения этого угла и так последовательно приближаться к желаемому результату [9]. Также для корректной работы программы необходима защита от неправильного ввода исходных данных, в частности, ввода угла отключения менее начального. Не менее важно создать простой и понятный интерфейс и осуществить защиту от невнимательности пользователя. Программа должна корректно работать при внесении изменений, предусмотренных постановкой задачи и проведением необходимых исследований, таким образом обеспечивая получение необходимых навыков и знаний для пользователя.

Оценка существующих программ показала, что подходящих альтернатив для решения этой задачи нет [10]. Рассмотрим подробнее возможности некоторых существующих программ.

Программное обеспечение (ПО) DIgSILENT PowerFactory предназначено для анализа и планирования режимов работы электрических сетей и систем. На сегодняшний день ПО DIgSILENT PowerFactory является одним из лидеров среди систем для анализа и планирования режимов работы электрических сетей и систем. PowerFactory включает постоянно растущий перечень поддерживаемых функций для решения прикладных задач. Вот некоторые из них: расчет симметричных и несимметричных установившихся режимов, токов короткого замыкания (КЗ) для одно-, двух- или трехфазных сетей произвольной конфигурации переменного и постоянного тока; моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов, расчеты статической и динамической устойчивости; создание пользовательских моделей регуляторов, например автоматического регулирования возбуждения, и идентификация их параметров по данным натуральных испытаний; моделирование и анализ утяжеленных и аварийных режимов [11; 12].

Программный комплекс MUSTANG предназначен для оперативного выполнения на ПЭВМ типа IBM-PC моделей 486 и выше расчетов по моделированию установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем. К достоинствам комплекса можно отнести возможность моделирования электромеханических переходных процессов. В состав комплекса также входит модуль «Утяжеление», который служит для определения предела передаваемой активной мощности и вычисления нормируемого коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности [13].

По мнению автора, несмотря на широкую функциональность подобных программ, для реализации имеющихся практических задач возникают все же некоторые сложности при желании внедрить их в учебный процесс, а именно:

– приобретение и установка программы в учебный компьютерный класс может быть достаточно дорогостоящей, и при этом программа должна работать в условиях локальной сети;

– на освоение и знакомство с интерфейсом программы может уйти учебного времени больше, чем на сам процесс получения основных понятий о динамической устойчивости;

– существующие программы предназначены для исследования сложных схем, а поставленные учебные цели должны реализовываться за ограниченное число часов [14].

Подводя итоги, можно сказать, что необходимой лаконичной, простой в понимании интерфейса и доступной программы для решения поставленной задачи нет. В связи с этим для решения задачи оценки динамической устойчивости простейшей электроэнергетической системы при симметричном коротком замыкании на воздушной линии и использования ее в лабораторном практикуме была написана программа в объектно ориентированной среде программирования Borland Delphi 7 [15; 16].

Условие задачи оценки динамической устойчивости. В качестве простейшей схемы взята схема типа «станция – шины неизменного напряжения», состоящая из следующих элементов: генератор, трансформатор, двухцепная линия электропередачи (ЛЭП), нагрузка.

Более распространенным считают появление на одной из цепей воздушной линии симметричного короткого замыкания с последующим его отключением, в связи с этим необходимо рассмотреть следующие режимы: I – нормальный; II – послеаварийный; III – аварийный, т. е. переход от нормального режима I к аварийному III и далее к послеаварийному II.

Анализ динамической устойчивости представленной сети необходимо выполнить при условии постоянства напряжения на шинах системы графическим методом [17].

Для анализа динамической устойчивости схемы необходимо определить угол предельного отключения короткого замыкания:

– в середине линии;

– в начале (конце) линии;

– для различных случаев вариаций параметров и событий:

при изменении схемы на однотрансформаторную;

при изменении длины линии;

при изменении мощности нагрузки [18].

Методика определения угла предельного отключения [17]. Графический метод состоит в сравнении площадок ускорения и торможения генератора, получаемых аналитическим путем. Для определения этих площадей необходимо построить характеристики мощности генератора $P = f(\delta)$ для различных режимов работы сети. Их можно получить из уравнения

$$P^k = \frac{E_\Gamma U_c}{X_c^k} \sin\delta,$$

где E_Γ и U_c – соответственно ЭДС генератора и напряжение системы; δ – угол между векторами E_Γ и U_c; X_c – реактивное сопротивление сети; k – индекс рассматриваемого режима.

В качестве рассматриваемых режимов берут:

I – нормальный режим;

II – послеаварийный;

III – аварийный.

Реактивное сопротивление сети определяют по суммарному выражению для заданной схемы, учитывая режим сети.

Угол предельного отключения (в радианах) может быть рассчитан как

$$\delta_{\text{отк.пр}} = \arccos \frac{P_0\left(\delta_{\text{кр}} - \delta_0\right)\frac{\pi}{180} + P_{m\text{II}} \cos\delta_{\text{кр}} - P_{m\text{III}} \cos\delta_0}{P_{m\text{II}} - P_{m\text{III}}},$$

где $\delta_0 = \arcsin \frac{P_0 X_{\text{с норм}}}{E_{\text{норм}}}$ – начальный угол; $\delta_{\text{кр}} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{m\text{II}}}$ – критический угол.

Площади ускорения и торможения можно определить по следующим формулам соответственно:

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{отк}}} (P_0 - P_{\text{III}}) d\delta;$$

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{\text{отк}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{\text{II}} - P_0) d\delta.$$

Реализация задачи в объектно ориентированной среде программирования Delphi. Задача анализа динамической устойчивости системы простейшей электрической сети в процессе обучения студентов реализуется в лабораторном практикуме по дисциплине «Переходные процессы в ЭЭС». С его помощью студент приобретает необходимые для усвоения принципиальные понятия, и именно с их помощью закладывается понимание физических закономерностей в какой-либо конкретной области. Лабораторный практикум по данной дисциплине удобнее реализовывать в компьютерном классе. В связи с этим и задача анализа динамической устойчивости системы простейшей электрической сети реализуется в программной разработке.

Программа разрабатывалась в объектно ориентированной среде программирования Delphi 7. В интерфейсе приложения предусмотрена работа с набором форм. Всего программа содержит 6 форм (окон) размером 928 на 259 пикселей, предназначенных для какой-либо цели.

Первая форма является окном приветствия, выводит на экран название и логотип института, лабораторной работы, имя автора, содержит в себе кнопку для продолжения работы.

Вторая форма «Выбор схемы» используется пользователем для выбора схемы сети (два варианта) в соответствии с заданием преподавателя (рис. 1). Форма содержит 2 рисунка, 2 радиокнопки, кнопку для продолжения, которая не будет работать, если не выбран ни один из вариантов схемы.

Третья форма «Выбор места КЗ» аналогична второй по структуре, на ней согласно заданию преподавателя выбирается место возникновения короткого замыкания и варианты включения выбранной схемы с одним трансформатором (рис. 2).

Четвёртая и пятая формы являются окнами для ввода данных, выданных преподавателем. Они содержат в себе окна типа «Tedit» для ввода исходных данных для заданной схемы, а также кнопки для продолжения и возврата на предыдущее окно и получения результата расчетных данных. После нажатия кнопки «Рассчитать сопротивления» на окно выводятся результаты расчета сопротивлений элементов схемы и суммарные сопротивления сети для разных режимов (рис. 3). Этой же формой следует воспользоваться при изменении длины линии.

Шестая форма «Определение угла предельного отключения» необходима для построения графиков характеристик при возникновении трёхфазного КЗ. Она содержит холст, на котором рисуются графики, окно типа «Tedit» для ввода угла отключения и две кнопки взаимодействия с программой, а также кнопку закрытия приложения.

Рассмотрим принцип работы формы 6 приложения. При нажатии на кнопку «Построить характеристики» появляется система координат с характеристиками режимов и P_0 и основные их параметры (рис. 4).

Ниже в окне пользователем вводится угол отключения в диапазоне от δ_0 до $\delta_{\text{кр}}$. После ввода угла и нажатия кнопки «Рассчитать площади» закрашиваются площади ускорения и торможения для введенного угла отключения (рис. 5) соответственно в зеленый и синий цвета, результаты вычислений значений величин площадей (для сравнения пользователем) выводятся ниже в соответствующую текстовую область формы. Если угол введен некорректно, на окно выводится сообщение-подсказка.

После сопоставления значений величин площадей пользователь вводит другое значение угла отключения,

подбирая в итоге такой, чтобы площади были равны (рис. 6). Этот угол и будет являться углом предельного отключения.

Далее процесс повторяют для заданных изменений. По полученным данным делают оценку динамической устойчивости электроэнергетической системы.

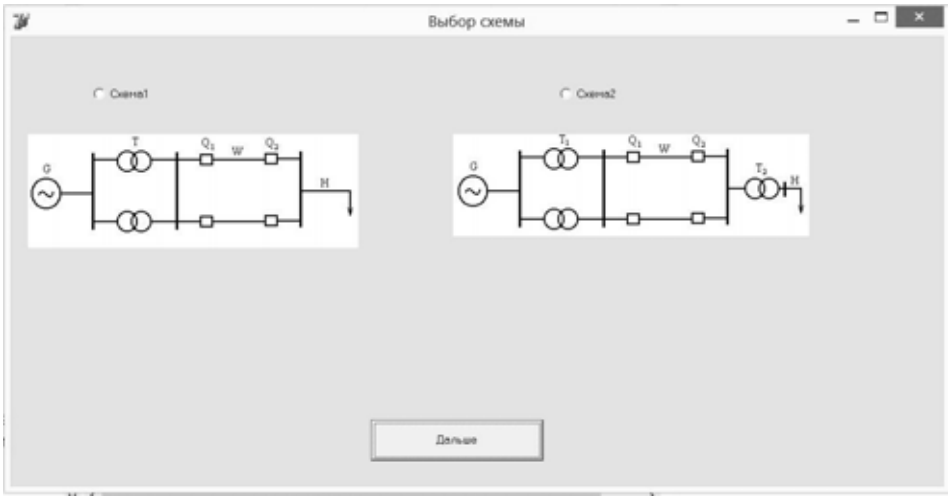


Рис. 1. Форма 2 приложения

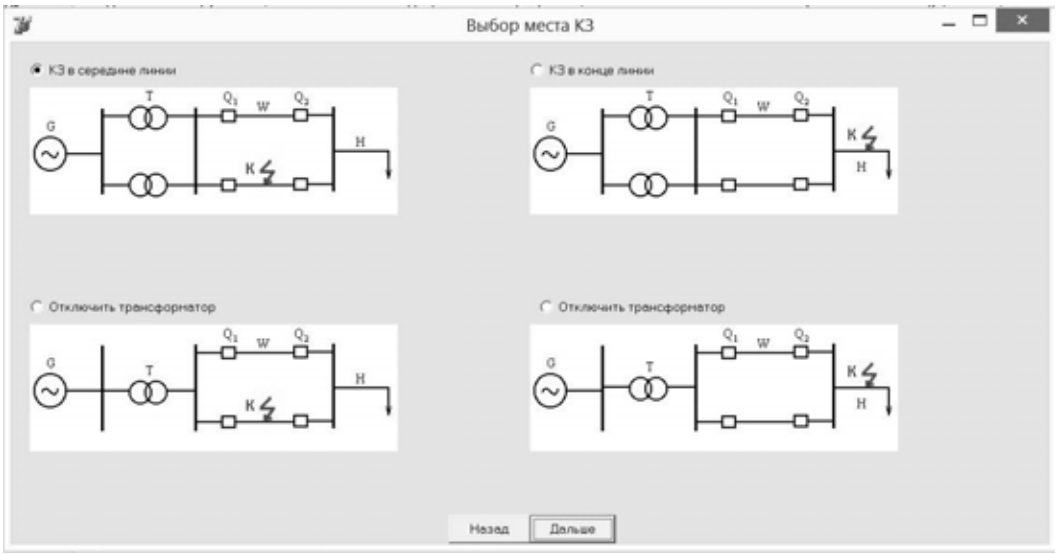


Рис. 2. Форма 3 приложения

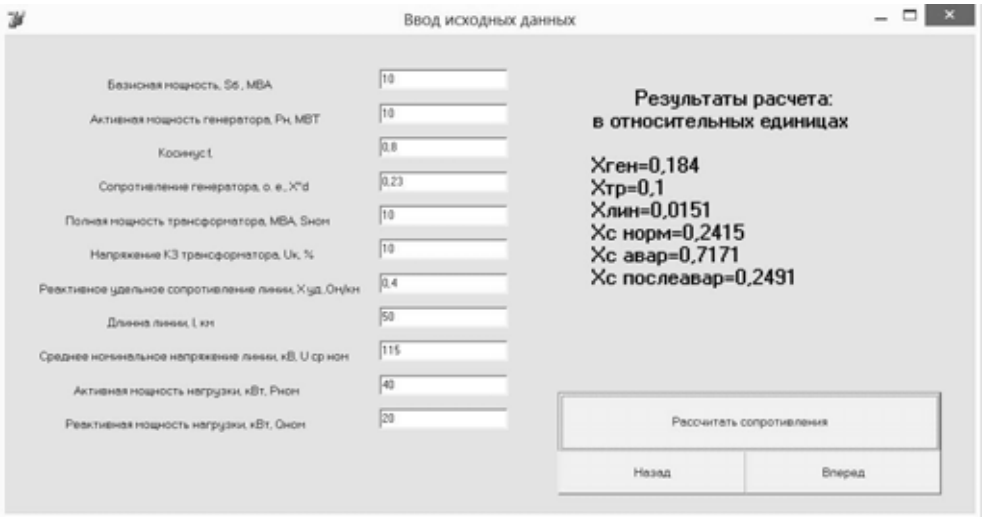


Рис. 3. Форма 5 приложения

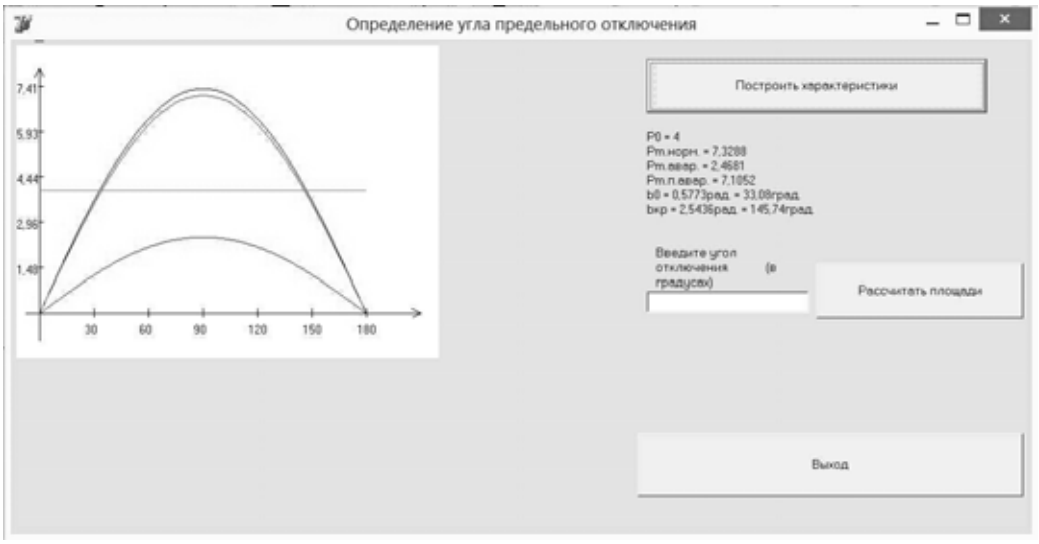


Рис. 4. Форма 6 приложения (система координат)

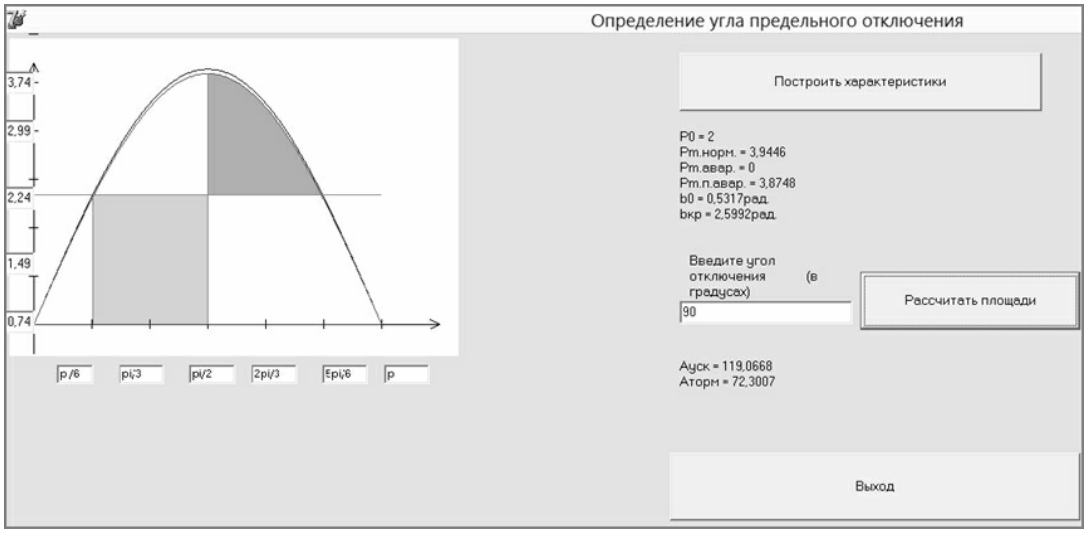


Рис. 5. Форма 6 приложения (расчет площадей для введенного угла отключения)

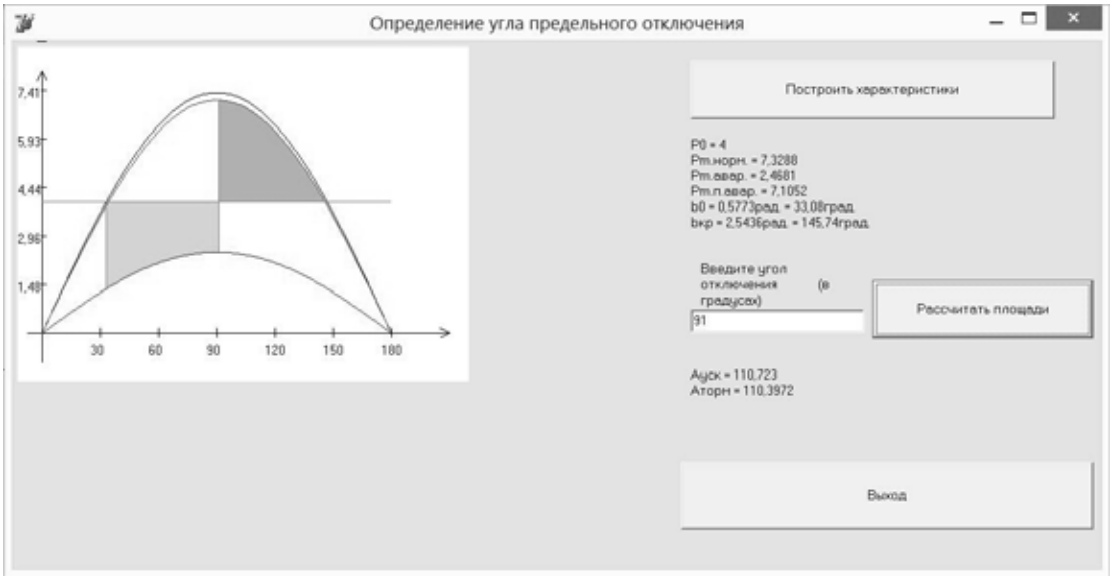


Рис. 6. Форма 6 приложения (подбор угла предельного отключения)

Заключение. Программная реализация задачи оценки динамической устойчивости электроэнергетических систем позволяет графически отразить динамику процесса, определить угол предельного отключения генератора при симметричных коротких замыканиях для заданных изменений: места короткого замыкания, разных конфигураций схем и исходных параметров сети. Программа работает корректно и выполнена с учетом всех поставленных целей для учебного процесса. Программная разработка имеет простой и понятный интерфейс, защиту от неправильного ввода данных и защиту от невнимательности пользователя, в ней осуществляется наглядный процесс анализируемой динамики устойчивости. Планируется расширение программы для возможности применения её к расчету несимметричных КЗ.

Библиографические ссылки

1. Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, Kosjenka Capuder. Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014, Vol. 56. P. 228–234.
2. Jinxin Ouyang, Xiaofu Xiong. Research on short-circuit current of doubly fed induction generator under non-deep voltage drop // Electric Power Systems. 2014. Vol. 107. P. 158–166.
3. Enhance power system transient voltage stability by difference coefficient of generator excitation system optimization / W. Sun [et al.] // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1008–1009. P. 409–416.
4. Transient stability study of distributed induction generators using an improved steady-state equivalent circuit method. Source of the Document / N. Zhou [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29 (2), 6632970. P. 608–616.
5. Платонова Е. В., Елизарьева Л. Л. Новые методические и программные разработки при организации лабораторного практикума с использованием ПЭВМ // Интеллектуальные ресурсы ХТИ – филиала КГТУ Хакасии : тезисы докладов второй региональной науч.-практ. конф. Абакан, 1999. С. 78–79.
6. Платонова Е. В., Хохрякова Е. Н., Елизарьева Л. Л. Информационные технологии в подготовке инженеров-электриков // Образовательные технологии: состояние и перспективы : тр. науч.-метод. конф. Томск, 1999. С. 129–130.
7. Платонова Е. В., Елизарьева Л. Л. Применение математических моделей для расчетов и анализа переходных процессов в электроэнергетических системах // Вестник ХТИ КГТУ. 1998. № 4. С. 49–57.
8. Federico Milano, Kailash Srivastava. Dynamic REI equivalents for short circuit and transient stability analyses // Electric Power Systems Research. 2009. Vol. 79, iss. 6. P. 878–887.
9. Zhenhua Wang Dynamic estimation of rotor angle deviation of a generator in multi-machine power systems // Electric Power Systems Research. 2013. Vol. 97. P. 1–9.
10. Anya Castillo. Risk analysis and management in power outage and restoration: A literature survey // Electric Power Systems. 2014. Vol. 107. P. 9–15.
11. Программа DIgSILENT PowerFactory [Электронный ресурс]. URL: http://regimov.net/content.php/79-DIgSILENT-PowerFactory (дата обращения: 28.06. 2014).
12. Thekla N. Boutsika, Stavros A. Papathanassiou. Short-circuit calculations in networks with distributed generation // Electric Power Systems Research. 2008. Vol. 78, iss. 7. P. 1181–1191.
13. Программа MUSTANG [Электронный ресурс]. URL: http://regimov.net/content.php/73-MUSTANG (дата обращения: 28.06.2014).
14. Iván García-Magariño. A collection of method fragments automated with model transformations in agent-oriented modeling // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2013. Vol. 26, iss. 3. P. 1131–1148.
15. An object-oriented framework applied to the study of electromechanical oscillations at Tucuruí hydroelectric power plant / José A. S. Sena [et al.] // Electric Power Systems Research. 2011. Vol. 21. P. 2081–2087.
16. Wang J., Lü Q., Liu H. Reactive power optimization software design based on hybrid programming of Delphi and Matlab for distribution system // Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment. 2011. Vol. 31 (4). P. 112–115.
17. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах. Новосибирск : НГТУ ; М. : Мир : АСТ, 2003. 283 с.
18. Enrique A. Zamora-Cárdenas, Claudio R. Fuerte-Esquivel. Computation of multi-parameter sensitivities of equilibrium points in electric power systems // Electric Power Systems Research. 2013. Vol. 96. P. 246–254.

References

1. Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, Kosjenka Capuder. Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, Vol. 56, March, P. 228–234.
2. Jinxin Ouyang, Xiaofu Xiong. Research on short-circuit current of doubly fed induction generator under non-deep voltage drop. *Electric Power Systems*, 2014, Vol. 107, February, P. 158–166.
3. Sun W., Su Y. S., Zhang J. F., Li X. M. Enhance power system transient voltage stability by difference coefficient of generator excitation system optimization. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1008–1009, P. 409–416.
4. Zhou N., Wang P., Wang Q., Loh P. C. Transient stability study of distributed induction generators using an improved steady-state equivalent circuit method. Source of the Document. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, Vol. 29 (2), 6632970, P. 608–616.
5. Platonova E. V., Elizarieva L. L. [New methodological and program development at the organization of laboratory practical work using PC]. *Tezisy dokladov vtoroy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Intelektual'nye resursy Khakaskii"* [Proc. 2th reg. scientific-practical Symp. "Intellectual resources KTI – KSTU branch of Khakassia"]. Abakan, 1999, P. 78–79 (In Russ.).

6. Platonova E. V., Khokhryakova E. N, Elizarieva L. L. [Information technologies in training of engineers-electricians]. *Proc. Nauchno-methodicheskoy conferentsii "Obrazovatel'nye technologii: sostoyanie I perspektivy"* [Proc. Scientific-methodical conference "Educational technology: status and prospects"]. Tomsk, 1999, P. 129–130 (In Russ.).

7. Platonova E. V., Elizarieva L. L. [Application of mathematical models for simulation and analysis of transient processes in power systems]. *Vestnik KhTI KGTU.* 1998, No. 4, P. 49–57 (In Russ.).

8. Federico Milano, Kailash Srivastava. Dynamic REI equivalents for short circuit and transient stability analyses. *Electric Power Systems Research*, 2009, Vol. 79, Iss. 6, June, P. 878–887.

9. Zhenhua Wang, Elham B. Makram, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Chaoqi Ji. Dynamic estimation of rotor angle deviation of a generator in multi-machine power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, Vol. 97, April, P. 1–9.

10. Anya Castillo. Risk analysis and management in power outage and restoration: A literature survey. *Electric Power Systems*, 2014, Vol. 107, February, P. 9–15.

11. Regimov.net. *Programma DIgSILENT PowerFactory* [Program DIgSILENT PowerFactory] (In Russ.). Available at: http://regimov.net/content.php/79-DIgSILENT-PowerFactory (accessed 18 March 2012).

12. Thekla N. Boutsika, Stavros A. Papathanassiou . Short-circuit calculations in networks with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2008, Vol. 78, Iss. 7, July, P. 1181–1191.

13. Regimov.net. *Programma MUSTANG* [Program MUSTANG] (In Russ.). Available at: http://regimov.net/content.php/73-MUSTANG (accessed 18 March 2012).

14. Iván García-Magariño. A collection of method fragments automated with model transformations in agent-oriented modeling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, Vol. 26, Iss. 3, March, P. 1131–1148.

15. José A. S. Sena, Maria C. P. Fonseca, Italo F. Di Paolo, Walter Barra Jr., José A. L. Barreiros, Carlos T. Costa Jr., Fabrício G. Nogueira. An object-oriented framework applied to the study of electromechanical oscillations at Tucuruí hydroelectric power plant. *Electric Power Systems Research*, 2011, Vol. 21, December, P. 2081–2087.

16. Wang J., Lü Q., Liu H. Reactive power optimization software design based on hybrid programming of Delphi and Matlab for distribution system. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment,* 2011, Vol. 31 (4), P. 112–115.

17. Kulikov Yu. A. *Perekhodnie protsessi v elektricheskikh sistemakh* [Transient processes in power systems]. Novosibirsk, NGTU, Moscow, Mir Publ., AST Publ., 2003, 283 p.

18. Enrique A. Zamora-Cárdenas, Claudio R. Fuerte-Esquivel. Computation of multi-parameter sensitivities of equilibrium points in electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, Vol. 96, March, P. 246–254.

© Латушкина Л. Л., 2015

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 338–342

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМЫТОСТИ ЯДРА В НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Е. Д. Михов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: edmihov@mail.ru

Исследуется проблема моделирования дискретно-непрерывных процессов в пространстве входных-выходных переменных. Моделирование данных процессов может осуществляться при помощи различных параметрических и непараметрических методов. Рассмотрено моделирование при помощи непараметрических методов. Такое решение было принято ввиду того, что непараметрическая теория, в отличие от параметрической теории, предполагает, что известны только качественные характеристики процесса. Зачастую, моделируемые объекты обладают неизвестной, сложной структурой. Учитывая эти факты, использование и развитие непараметрической теории продолжает быть актуальной задачей современности. Результаты статьи могут быть использованы для моделирования и управления оборудованием космических аппаратов.

При построении модели объекта при помощи ядерных оценок, важным параметром является коэффициент размытости ядра. Рассмотрены алгоритмы оптимизации коэффициента размытости ядра, а именно: метод перебора, метод деформируемого многогранника и генетический алгоритм. В качестве критерия оптимизации была выбрана среднеквадратичная ошибка модели исследуемого процесса, вычисленная при помощи скользящего экзамена. Стоит еще также сказать, что будут представлены результаты при оптимизации вектора параметров размытости ядра (для каждого входного воздействия) и при оптимизации общего коэффициента на все входные взаимодействия. Как выясняется, точность модели с одним оптимизированным параметром размытости ядра несколько уступает точности модели с оптимизированным вектором параметров размытости ядра, при этом вычисление коэффициента размытости ядра выполняется в разы быстрее и, как следствие, быстрее строится модель. Данные результаты могут быть крайне полезны при моделировании и управлении в условиях быстрого поступления информации и меняющейся обстановки.

Ключевые слова: непараметрическая модель, непараметрические алгоритмы, коэффициент размытости, оптимизация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 338–342

OPTIMIZATION OF COEFFICIENT OF BLURRING OF THE KERNEL IN NONPARAMETRIC MODELLING

E. D. Mihov

Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: edmihov@mail.ru

A modeling of discrete-continuous processes in space “input-output” variables. Modeling of these processes can be carried out using various parametric and nonparametric. This article deals with modeling using nonparametric methods. This decision was taken in view of the fact that non-parametric theory, in contrast to the parametric theory assumes that the only known qualitative characteristics of the process. The modeling objects often have an unknown and complex structure. Given these facts, the use and development of nonparametric theory continues to be an urgent task of our time. Our results can be used to equipment spacecraft modeling and them managing.

When building a model of the object by means of nuclear grade, an important parameter – the coefficient blur kernel. The algorithms optimize the ratio blur kernel, namely the method of enumeration, the flexible polyhedron method and genetic algorithm. As an optimization criterion was selected standard error of the test process models, calculated using the sliding test. It is worth also say that the results will be presented in the optimization parameter vector blur kernel (for each input action), and in the optimization of the overall coefficient on the interaction of all the input. As it turns out, the accuracy of the model to optimize the parameters of a blur kernel is slightly inferior to the accuracy of the model with optimized parameter vector blur kernel, and the calculation of the coefficient of blur kernel runs much faster

and, as a consequence, the model will be built. These results can be extremely useful in modeling and managing the rapid flow of information and the changing environment.

Keywords: nonparametric model, nonparametric algorithms, diffuseness coefficient, optimization.

Введение. Идентификация многих стохастических объектов часто сводится к идентификации статических систем. Наиболее общая схема исследуемого дискретно-непрерывного процесса может быть представлена на нижеследующем рисунке[1–3]:

На рис. 1 приняты следующие обозначения: А – исследуемый объект (процесс); $\overrightarrow{x(t)}$ – выходной вектор процесса; $\overrightarrow{u(t)}$ – вектор управляющих воздействий; $\overrightarrow{\mu(t)}$ – вектор входных неуправляемых, но измеряемых переменных процесса; $\overrightarrow{\lambda(t)}$ – вектор входных неуправляемых и неизмеряемых переменных процесса; $\xi(t)$ – случайное воздействие, $\omega^i(t)$, $i = 1, 2, ..., k$ – переменные процесса, контролируемые по длине объекта; (t) – непрерывное время; H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{z}, H^{q}, H^{ω} – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных; μ_t, u_t, x_t, ω_t – означают измерение $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время; $\overrightarrow{h^{\mu}(t)}$, $\overrightarrow{h^{u}(t)}$, $\overrightarrow{h^{x}(t)}$, $\overrightarrow{h^{\omega}(t)}$ со значком вверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

Идентификация в узком и широком смысле. При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в узком смысле [4; 5]. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации, определяется параметрический класс оператора объекта *A*, например:

$$\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t), \alpha), \qquad (1)$$

где A^{α} – параметрическая структура модели; α – вектор параметров.

На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$, *s* – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (1).

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например, линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$ [6; 7]:

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s), \qquad (2)$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, ..., x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, ..., u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в широком смысле, является более адекватной реальным задачам практики.

Непараметрическая идентификация. Непараметрическая идентификация представляется в виде моделирования при помощи ядерных оценок (3) [8; 9]:

$$x^*_{s+1} = \frac{\sum_{i=1}^{s} u_{(i)1} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u^*_{n,s+1} - u_{n,i}}{c_s^{\,x}}\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u^*_{n,s+1} - u_{n,i}}{c_s^{\,x}}\right)}, \qquad (3)$$

где $\Phi(^*)$ – это ядерная «сглаживающая» функция (4), а c_s^x – коэффициент размытости ядра:

$$\Phi(o) = \begin{cases} 1 - |o|, \text{ если } |o| \le 1, \\ 0 \quad , \text{если } 1 < |o|. \end{cases} \qquad (4)$$

Стоит сказать, что от выбранного коэффициента размытости напрямую зависит качество построенной модели. Данный коэффициент определяет степень участия элементов выборки в вычислении $\hat{x}_{s+1}$ в точке $u_м$ (рис. 2).

Ход исследования. Смысл исследования заключается в выборе наиболее точного и быстрого способа оптимизации, а также в выяснении вопроса о необходимости оптимизации коэффициента размытости для каждого входного воздействия. Все исследования проведены на машине с 4-ядерным процессором, с частотой ядер 2,8 ГГц. Программы написаны в среде Visual Studio 2010, на языке программирования C#.

Для начала оптимизируем вектор коэффициента размытости ядра при помощи метода деформируемых многогранников. Слабостью данного метода можно считать то, что при нахождении минимума он может «застрять» в локальном экстремуме. Для того чтобы определить, применим ли данный метод для оптимизации cs, построим график зависимости среднеквадратичной ошибки (σ) от cs (рис. 3).

Как видно на рис. 3, данная зависимость плавная, и в ней нет большого количества локальных минимумов. В связи с этим можно проводить оптимизацию cs при помощи метода деформируемого многогранника [10; 11].

Алгоритм данного метода следующий:

Параметрами метода являются:

– коэффициент отражения α > 0, обычно выбирается равным 1;

– коэффициент сжатия β > 0, обычно выбирается равным 0,5;

– коэффициент растяжения γ > 0, обычно выбирается равным 2.

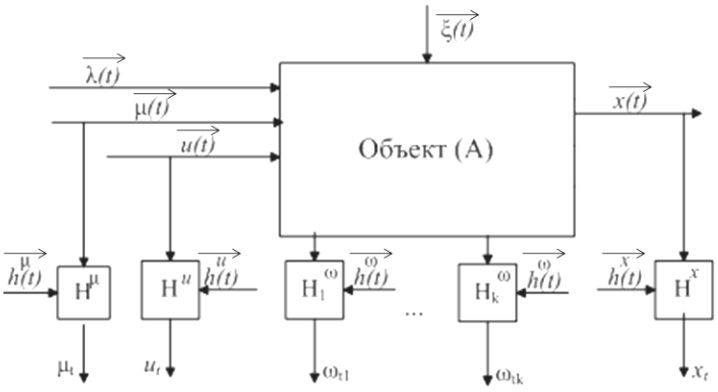


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса

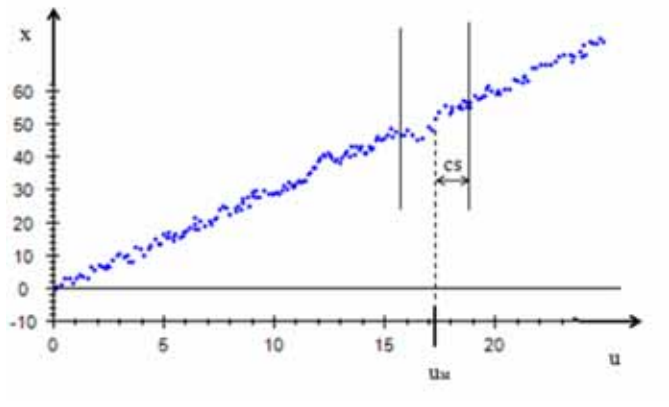


Рис. 2. Определение коэффициента размытости ядра

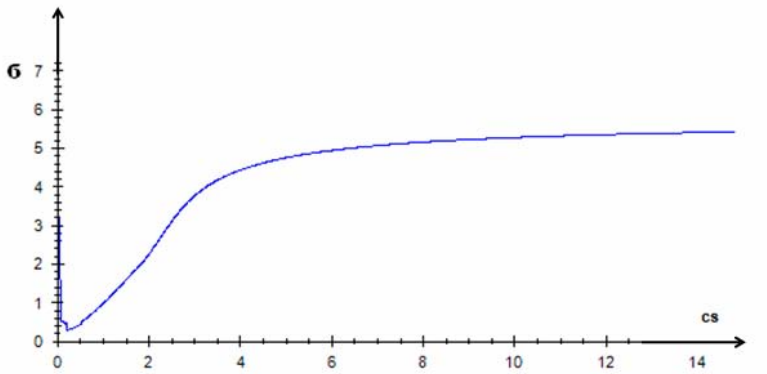


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной ошибки от коэффициента размытости ядра

1. «Подготовка». Вначале выбираются $n + 1$ точки $x_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(n)})$, $i = 1\ldots n + 1$, образующие симплекс n-мерного пространства; в этих точках вычисляются значения функции:

$$f_1 = f(x_1),\ f_2 = f(x_2),\ \ldots,\ f_{n+1} = f(x_{n+1}). \qquad (5)$$

2. «Сортировка». Из вершин симплекса выбираем три точки: x_h с наибольшим (из выбранных) значением функции f_h, x_g со следующим по величине значением f_g и x_l с наименьшим значением функции f_l. Целью дальнейших манипуляций будет уменьшение по крайней мере f_h.

3. Найдём центр тяжести всех точек, за исключением x_h:

$$x_c = \frac{1}{n}\sum_{i=1, i\neq h}^{n} x_i. \qquad (6)$$

4. «Отражение». Отразим точку x_h относительно x_h с коэффициентом α, получим точку x_r и вычислим в ней функцию $f_r = f(x_r)$. Координаты новой точки вычисляются по формуле

$$x_r = (1+\alpha)x_c - \alpha x_h. \qquad (7)$$

5. Далее смотрим, насколько нам удалось уменьшить функцию, ищем место f_r в ряду f_h, f_g, f_l.

Если $f_r < f_l$, то направление выбрано удачное и можно попробовать увеличить шаг. Производим

«растяжение». Новая точка $x_e = (1 - \gamma)x_c + \gamma x_r$ и значение функции $f_e = f(x_e)$.

Если $f_e < f_r$, то можно расширить симплекс до этой точки: присваиваем точке x_h значение x_e и заканчиваем итерацию (шаг 9).

Если $f_r < f_e$, то переместились слишком далеко: присваиваем точке x_h значение x_r и заканчиваем итерацию (шаг 9).

Если $f_l < f_r < f_g$, то выбор точки неплохой (новая лучше двух прежних). Присваиваем точке x_h значение x_r и переходим на шаг 9.

Если $f_g < f_r < f_h$, то меняем местами значения x_r и x_h. Также нужно поменять местами значения f_r и f_h. После этого идём на шаг 6.

Если $f_h < f_r$, то просто идём на следующий шаг 6.

В результате (возможно, после переобозначения) $f_l < f_g < f_h < f_r$.

6. «Сжатие». Строим точку $x_s = \beta x_h + (1 - \beta)x_c$ и вычисляем в ней значение $f_s = f(x_s)$.

7. Если $f_s < f_h$, то присваиваем точке x_h значение x_s и идём на шаг 9.

8. Если $f_s > f_h$, то первоначальные точки оказались самыми удачными. Делаем «глобальное сжатие» симплекса – гомотетию к точке с наименьшим значением x_l:

$$x_i \leftarrow x_l + \frac{(x_i - x_l)}{2},\ i \neq l\,. \qquad (8)$$

9. Последний шаг – проверка сходимости. Может выполняться по-разному, например, оценкой дисперсии набора точек. Суть проверки заключается в том, чтобы проверить взаимную близость полученных вершин симплекса, что предполагает и близость их к искомому минимуму. Если требуемая точность ещё не достигнута, можно продолжить итерации с шага 2.

После этого вектор коэффициентов размытости ядра будет оптимизироваться при помощи генетического алгоритма [12–15]. Генетический алгоритм выглядит следующим образом:

1. Перед первым шагом нужно случайным образом создать начальную популяцию. Даже если она окажется совершенно неконкурентоспособной, вероятно, что генетический алгоритм всё равно достаточно быстро переведёт её в жизнеспособную популяцию. Таким образом, на первом шаге можно особенно не стараться сделать слишком уж приспособленных особей, достаточно, чтобы они соответствовали формату особей популяции и на них можно было подсчитать функцию приспособленности (Fitness). Итогом первого шага является популяция H, состоящая из N особей.

2. Размножение в генетических алгоритмах обычно половое – чтобы произвести потомка, нужны несколько родителей, обычно два.

Размножение в разных алгоритмах определяется по-разному – оно, конечно, зависит от представления данных. Главное требование к размножению, чтобы потомок или потомки имели возможность унаследовать черты обоих родителей, «смешав» их каким-либо способом.

Особи для размножения обычно выбираются из всей популяции H, а не из выживших на первом шаге элементов H_0 из-за того, что проблема многих генетических алгоритмов – недостаток разнообразия (diversity) в особях. Достаточно быстро выделяется один-единственный генотип, который представляет собой локальный максимум, а затем все элементы популяции проигрывают ему отбор, и вся популяция «забивается» копиями этой особи. Есть разные способы борьбы с таким нежелательным эффектом. Один из них – выбор для размножения не самых приспособленных, а вообще всех особей.

3. К мутациям относится все, что и к размножению: есть некоторая доля мутантов m, являющаяся параметром генетического алгоритма, и на шаге мутаций нужно выбрать mN особей, а затем изменить их в соответствии с заранее определёнными операциями мутации.

На этапе отбора нужно из всей популяции выбрать определённую её долю, которая останется «в живых» на этом этапе эволюции. Есть разные способы проводить отбор. Вероятность выживания особи h должна зависеть от значения функции приспособленности Fitness(h). Сама доля выживших s обычно является параметром генетического алгоритма и её просто задают заранее. По итогам отбора из N особей популяции H должны остаться sN особей, которые войдут в итоговую популяцию H'. Остальные особи погибают.

Вычислительный эксперимент. Моделируемый процесс имеет два входных воздействия и один выходной параметр. Обучающая выборка была взята в количестве 300. Помеха, воздействующая на объект, была равна 7 %. Критерием оптимизации была выбрана среднеквадратичная ошибка σ:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\,. \qquad (9)$$

Выведем результаты в виде таблицы.

Результаты оптимизации cs

Метод оптимизации	Оптимизируемый параметр	Время нахождения оптимального cs, миллисекунд	Среднеквадратичная ошибка σ
Метод деформируемого многогранника	Вектор cs	1118	0,750869
Метод деформируемого многогранника	Скаляр cs	100	0,755853
Перебор возможных значений	Вектор cs	26808	0,780678
Перебор возможных значений	Скаляр cs	934	0,78102
Генетический алгоритм	Вектор cs	39067	0,758035
Генетический алгоритм	Скаляр cs	37028	0,761118

Как мы можем видеть из таблицы, оптимизация вектора коэффициента размытости занимает во много раз больше времени, чем оптимизация скалярного значения, при этом модель практически не становится лучше.

Также стоит отметить, что оптимизация при помощи метода деформируемых многогранников действует гораздо быстрее, чем оптимизация при помощи стандартного перебора или генетического алгоритма.

Заключение. В статье приведены такие методы оптимизации, как метод деформируемых многогранников, генетический алгоритм и простой перебор возможных значений, и показаны результаты работы данных методов.

Также была доказана возможность использования методов локальной оптимизации для нахождения наилучшего коэффициента размытости ядра.

Было проведено сравнение между оптимизацией при помощи метода деформируемых многогранников, генетического алгоритма и оптимизацией при помощи стандартного перебора, где было доказано превосходство первого в задаче оптимизации коэффициента размытости ядра.

Доказано, что оптимизация вектора коэффициентов размытости является нецелесообразной вследствие больших затрат времени и малого изменения в точности модели исследуемого процесса.

Библиографические ссылки

1. Tweedle V. Smith R. A mathematical model of Bieber Fever // Transworld Research Network. 2012. Vol. 37/661, № 2. P. 157–177.

2. Lingefard T. Faces of mathematical modeling // ZDM. 2006. Vol. 38, № 2. P. 96–112.

3. Советов Б. Я, Яковлев С. А. Моделирование систем : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 2001. 343 с.

4. Арнольд В. Теория катастроф. М. : Наука, 1990. 128 с.

5. Медведев А. В. Некоторые замечания к *H*-моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 24–34.

6. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Т. 2. Минск : БГУ, 1995. С. 201–206.

7. Медведев А. В. *H*-модели для безынерционных систем с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2012. № 5(45). С. 84–89.

8. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968. 400 с.

9. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963. 552 с.

10. Рубан А. И. Методы анализа данных : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. 319 с.

11. Marco A., Rodolphe Le Riche. Globalized Nedler-Mead methods for engineering optimization // ELSIVIER Science direct. 2004. Vol. 1. P. 2–10.

12. Prayoth Kumsawat A Genetic Algorithm Optimization Technique for Multiwavelet – Based Digital Audio Watermarking // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2010. Vol. 1. P. 15–25.

13. Colin R. Reeves Genetic Algorithms for the Operations Researcher // INFORMS Journal on Computing. 1997. Vol. 9, no. 3. P. 231–250.

14. Jeffrey J. The application of genetic algorithm in GIS network analysis // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2000. Vol. 33, part B 4. P. 1184–1191.

15. Raymond C., Ooi Koon B. A Comparison between Genetic Algorithms and Evolutionary Programming based on Cutting Stock Problem // Engineering Letters. 2007. P. 115.

References

1. Tweedle V., Smith R. A mathematical model of Bieber Fever. *Transworld Research Network*, 2012, Vol. 37/661, No. 2, P. 157–177.

2. Lingefard T. Faces of mathematical modeling. *ZDM*, 2006, Vol. 38, No. 2, P. 96–112.

3. Sovetov V., Yakovlev S. *Modelirovanie sistem* [Simulation systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, P. 343.

4. Arnold V. *Teoriya katastrof* [Catastrophe Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 128 p.

5. Medvedev A. V. [Some notes on H-models for non-inertis systems with a delay] *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 5 (54), P. 24–34 (In Russ.).

6. Medvedev A. V. [Analysis of the data in the problem identification]. *Komp'yuternyy analiz dannykh modelirovaniya* [Computer analysis of simulation data]. 1995. Vol. 2, P. 201–206.

7. Medvedev A. V. [H-model for non-inertia systems with delay]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 5 (54), P. 84–89 (In Russ.).

8. Zipkin Ya. *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh* [Adaptation and learning in automatic systems], Moscow, Nauka Publ., 1968, 400 p.

9. Feldbaum A. *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of optimal automatic systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 552 p.

10. Ruban A. I. *Metody analiza dannykh* [Methods of Data Analysis]. Krasnoyarsk, CPI KSTU Publ., 2004, 319 p.

11. Marco A., Rodolphe Le Riche. Globalized Nedler-Mead methods for engineering optimization. *ELSIVIER Science direct*, 2004, Vol. 1, P. 2–10.

12. Prayoth Kumsawat. A Genetic Algorithm Optimization Technique for Multiwavelet - Based Digital Audio Watermarking. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, Vol. 1, P. 15–25.

13. Colin R. Reeves. Genetic Algorithms for the Operations Researcher. *INFORMS Journal on Computing*, 1997, Vol. 9, No. 3, P. 231–250.

14. Jeffrey J. The application of genetic algorithm in GIS network analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, Vol. 33, Part B4, P. 1184–1191.

15. Raymond C., Ooi Koon B. A Comparison between Genetic Algorithms and Evolutionary Programming based on Cutting Stock Problem. Engineering Letters 2007, 115 p.

© Михов Е. Д., 2015

UDC 539.374

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 343–359

CONSTRUCTION OF ELASTO-PLASTIC BOUNDARIES USING CONSERVATION LAWS

S. I. Senashov*, E. V. Filyushina, O. V. Gomonova

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: sen@sibsau.ru

The solution of elasto-plastic problems is one of the most complicated and actual problems of solid mechanics. Traditionally, these problems are solved by the methods of complex analysis, calculus of variations or semi-inverse methods. Unfortunately, all these methods can be applied to a limited number of problems only.

In this paper, a technique of conservation laws is used. This technique allows constructing analytical formulas to determine the elasto-plastic boundary for a wide class of problems. As a result, the elasto-plastic boundaries were constructed for twisted straight rods with cross sections limited by piecewise smooth contour, for flexible consoles with constant cross-sections, as well as for anti-plane problems. Computer programs for construction of elasto-plastic boundaries for twisted straight rods were written using obtained technique.

In this work, the elasto-plastic boundary arising during the torsion of a straight beam of arbitrary cross section, which is limited by a piecewise smooth contour is constructed; and the elasto-plastic boundaries for the problems of a consol bending and anti-plane deformation are found. The plan of the paper is the following. In the first section the basic equations of elasticity and boundary problems are considered; in the second section the basic equations of the theory of ideal plasticity of von Mises are given; in the third section the conditions on the boundaries of the elastic and plastic domains are formulated. The fourth section is devoted to torsion of elastic prismatic rods; the fifth one describes elastic bending of bars; in the sixth section the plane problem of theory of elasticity is given. The seventh section covers an anti-plane problem of elasticity theory; in the eighth section, conservation laws for the equations of elasticity are constructed; in the ninth one, conservation laws of two-dimensional equations of plasticity are discussed. In the tenth section an elasto-plastic boundary of a twisted straight rod is found; in the eleventh one an elasto-plastic boundary in the bended console is given; and finally, in the twelfth section a method for the construction of elasto-plastic boundaries for large areas is described.

Keywords: conservation laws, elasto-plastic boundary, exact solutions, elasticity, plasticity, elasto-plasticity.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 343–359

ПОСТРОЕНИЕ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ГРАНИЦ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ

С. И. Сенашов*, Е. В. Филюшина, О. В. Гомонова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: sen@sibsau.ru

Решение упруго-пластических задач – одна из сложнейших и актуальных проблем механики деформируемого твердого тела. Традиционно эти задачи решаются или методами ТФКП, вариационного исчисления, или полуобратными методами. К сожалению, все эти методы могут быть применены лишь к ограниченному числу задач. В работе используется техника законов сохранения. Это позволяет построить аналитические формулы для нахождения упруго-пластической границы для широкого класса задач. В результате удалось построить упруго-пластические границы: для скручиваемых прямолинейных стержней, сечение которых ограничено кусочно-гладким контуром; для изгибаемых консолей постоянного сечения, а также для антиплоских задач. Разработанная методика позволила написать компьютерные программы для построения упруго-пластических границ для скручиваемых прямолинейных стержней. В предлагаемой работе построена упруго-пластическая граница, возникающая при кручении прямолинейного бруса произвольного сечения, которое ограничено кусочно-гладким контуром, а также упруго-пластическая граница в задачах об изгибе консоли и антиплоской деформации. В первом разделе статьи рассмотрены основные уравнения упругости и краевые задачи, во втором – даны основные уравнения теории идеальной пластичности Мизеса, в третьем – сформулированы условия на границах упругих и пластических областей, в четвертом – рассмотрено кручение призматических упругих стержней, в пятом – описан упругий изгиб брусьев, в шестом – рассмотрена плоская задача теории упругости,

в седьмом – описана антиплоская задача теории упругости, в восьмом – построены законы сохранения для уравнений упругости, в девятом – рассмотрены законы сохранения двумерных уравнений пластичности, в десятом – найдена упруго-пластическая граница в скручиваемом прямолинейном стержне, в одиннадцатом – найдена упруго-пластическая граница в изгибаемой консоли, в двенадцатом – предложена методика для построения упруго-пластических границ для областей больших размеров.

Ключевые слова: законы сохранения, упруго-пластическая граница, точное решение, упругость, пластичность, упруго-пластичность.

Introduction. Solution of elasto-plastic problems is one of the most complicated and actual problems of solid mechanics. It is determined by the fact that elasto-plastic boundary is not known in advance and should be defined during the solution of a problem. The elasto-plastic problems were considered by many well-known mechanicians. One can find a good review in works of B. D. Annin and G. P. Cherepanov [1], L. A. Galin [2; 3]. For the moment, a common approach for solving such problems has not been worked out yet. There are only a few single solutions for different special cases. As classical results one should consider an exact solution for the problem of elasto-plastic torsion of a rod with oval cross-section constructed by V. V. Sokolovsky, as well as solution of L. A. Galin for the problem of straining of a plane with circular hole.

An interesting theoretical result was obtained by B. D. Annin [1]. He proved the unique existence for the problem of elasto-plastic torsion of the rod with oval cross-section.

For solving of the elasto-plastic problem the methods of complex analysis, calculus of variations or semi-inverse methods were applied. In this paper, for construction of the elasto-plastic boundary the conservation laws were used. The conservation laws were applied in works [4–6] for the solving of the problem of 2-dimensional ideal plasticity; they allowed to obtain analytical solutions of Cauchy and Riemann problems. In following works of one of the co-authors of the present article the conservation laws were used for solving of some elasto-plastic problems [7; 8]. The obtained method allowed to write an algorithm (computer programs) for construction of elasto-plastic boundaries of twisted straight rods. For these programs the certificates of State registration are got [9; 10].

In present paper the elasto-plastic boundary for the problem of torsion of a straight beam of arbitrary cross-section, which is limited by a piecewise smooth contour is constructed; and the elasto-plastic boundaries for the problems of a consol bending and anti-plane deformation are found. For convenience, the article is divided into sections. In the first section the basic equations of elasticity and boundary problems are considered; in the second section the basic equations of the theory of ideal plasticity of von Mises are given; in the third section the conditions on the boundaries of the elastic and plastic domains are formulated. The fourth section is devoted to torsion of elastic prismatic rods; the fifth one describes elastic bending of bars; in the sixth section the plane problem of theory of elasticity is given. The seventh section covers an anti-plane problem of elasticity theory; in the eighth section, conservation laws for the equations of elasticity are constructed; in the ninth one, conservation laws of two-dimensional equations of plasticity are discussed. In the tenth section an elasto-plastic boundary of a twisted straight rod is found; in the eleventh one an elasto-plastic boundary in the bended console is given; and finally, in the twelfth section a method for the construction of elasto-plastic boundaries for large areas is described.

1. The Basic Equations of Elasticity and Boundary Problems. Let's consider steady-state equations of linear isotropic elasticity.

The equilibrium equations look like:

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}+X=0,$$

$$\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}+Y=0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+Z=0,$$

here $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ are components of a stress tensor, X, Y, Z are components of an external force affected to a unit of volume. The components of a stress tensor related to components of a strain tensor by means of Hook's law:

$$\sigma_x=\lambda\varepsilon+2\mu\varepsilon_x,\ \ \sigma_y=\lambda\varepsilon+2\mu\varepsilon_y,\ \ \sigma_z=\lambda\varepsilon+2\mu\varepsilon_z,$$
$$\tau_{xy}=2\mu\varepsilon_{xy},\ \ \tau_{xz}=2\mu\varepsilon_{xz},\ \ \tau_{yz}=2\mu\varepsilon_{yz}. \qquad (2)$$

Here $\varepsilon=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}$, $\varepsilon_x=\frac{\partial u}{\partial x}$, $\varepsilon_y=\frac{\partial v}{\partial y}$, $\varepsilon_z=\frac{\partial w}{\partial z}$, $2\varepsilon_{xy}=\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}$, $2\varepsilon_{xz}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}$, $2\varepsilon_{yz}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}$, and λ, μ are constants of Lamé, u, v, w are components of a vector of deformations, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ are components of a strain tensor.

Taking into account (2), equations of theory of elasticity can be written using displacements:

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}+\mu\Delta u=0,$$

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}+\mu\Delta v=0, \qquad (3)$$

$$(\lambda+\mu)\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}+\mu\Delta w=0,$$

here Δ is the Laplace operator.

On account of (2) the components of a stress tensor are in accord with the compatibility equations along with the equilibrium equations (1). The compatibility equations here are written in case of absence of external forces:

$$(1+\nu)\Delta\sigma_x + \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = 0,\ \ (1+\nu)\Delta\sigma_y + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} = 0,$$

$$(1+\nu)\Delta\sigma_z + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} = 0,\ \ (1+\nu)\Delta\tau_{xy} + \frac{\partial^2\theta}{\partial x\partial y} = 0, \qquad (4)$$

$$(1+\nu)\Delta\tau_{xz} + \frac{\partial^2\theta}{\partial x\partial z} = 0,\ \ (1+\nu)\Delta\tau_{yz} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y\partial z} = 0,$$

$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$, ν is a Poisson's ratio.

Problems for elasticity equations are usually pose either using displacements (in this case one have to solve equations (3)) or using stresses (in that case one solves equations (1)–(3)).

If a problem is written using stresses, one should add boundary conditions to equations (1), (3):

$$\overline{X} = \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n,$$

$$\overline{Y} = \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n, \qquad (5)$$

$$\overline{Z} = \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n,$$

here $l,\ m,\ n$ are direction cosines of an external normal line to the boundary surface at point under study, $\overline{X},\ \overline{Y},\ \overline{Z}$ are components of a vector of superficial forces affected to a unit of area.

If the problem is written in displacements then on a boundary S these displacements are specified:

$$u/_s = \overline{u},\ \ v/_s = \overline{v},\ \ w/_s = \overline{w}, \qquad (6)$$

here $\overline{u},\ \overline{v},\ \overline{w}$ are certain functions on S.

Remark. There are others problems in the theory of elasticity, but they are not adduced in this article.

2. The Basic Equations of the Theory of Plasticity of Mises. For steady-state equations of the theory of plasticity of Mises one should add the plasticity law of Mises to the equilibrium equations (1). This law looks like:

$$\left(\sigma_x - \frac{1}{3}\theta\right)^2 + \left(\sigma_y - \frac{1}{3}\theta\right)^2 + \left(\sigma_z - \frac{1}{3}\theta\right)^2 + \\ + 2\tau_{xy}^2 + 2\tau_{xz}^2 + 2\tau_{yz}^2 = 2k^2, \qquad (7)$$

here k is a yield point under simple shear.

In the case of plane deformation the plasticity law (7) can be reduce to form:

$$\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2. \qquad (8)$$

In plastic domain, the components of deviator of the strain tensor relate to the components of tensor of a strain rate with correlations

$$\sigma_x - \tfrac{1}{3}\theta = S_x = \Lambda e_x,\ \ \sigma_y - \tfrac{1}{3}\theta = S_y = \Lambda e_y,$$

$$\sigma_z - \tfrac{1}{3}\theta = S_z = \Lambda e_z,\ \ \tau_{xy} = \Lambda e_{xy}, \qquad (9)$$

$$\tau_{yz} = \Lambda e_{yz},\ \ \tau_{xz} = \Lambda e_{xz},$$

here Λ is a nonnegative function obtained from (7):

$$e_x = \frac{\partial u^1}{\partial x},\ \ e_y = \frac{\partial u^2}{\partial y},\ \ e_z = \frac{\partial u^3}{\partial z},$$

$$2e_{xy} = \frac{\partial u^1}{\partial y} + \frac{\partial u^2}{\partial x},\ \ 2e_{xz} = \frac{\partial u^1}{\partial z} + \frac{\partial u^3}{\partial x}, \qquad (10)$$

$$2e_{yz} = \frac{\partial u^2}{\partial z} + \frac{\partial u^3}{\partial y},$$

here u^1, u^2, u^3 are components of the vector of strain rate.

3. Conditions on the Boundaries of the Elastic and Plastic domains. Determination of a boundary separating elastic and plastic domains is one of the most difficult problems of the solid mechanics. The boundary is not known in advance and is defined during the elasto-plastic problem solving. In some cases a shape of the boundary can be guessed by general considerations.

Assume that an elastic state of a medium continuously changes over to a yield state. In this case close to elasto-plastic boundary and on each side of it the Hook's law is applies. This fact leads to the continuity of all components of the stress tensor and strain tensor, on the elasto-plastic boundary.

4. Torsion of Elastic Prismatic Rods. Let's consider an elastic prismatic rod with a cross-section of a variable form. It's lateral surface is free from efforts, face planes have forces equivalent to rotational moment M.

Let the coordinate origin is placed in an arbitrary point of the face plane and axis z is parallel to generatrix of the rod. The boundary conditions (3) will look like:

$$\sigma_x l + \tau_{xy} m = 0,$$

$$\tau_{xy} l + \sigma_y m = 0, \qquad (11)$$

$$\tau_{xz} l + \tau_{yz} m = 0,$$

and on the face planes of the rod ($z = 0,\ z = l$)

$$\iint_\Omega \tau_{xz}\,dxdy = 0,\ \ \iint_\Omega \tau_{yz}\,dxdy = 0,$$

$$\iint_\Omega \sigma_z\,dxdy = 0,\ \ \iint_\Omega x\sigma_z\,dxdy = 0, \qquad (12)$$

$$\iint_\Omega y\sigma_z\,dxdy = 0,$$

$$\iint_\Omega \left(x\tau_{yz} - y\tau_{xz}\right)dxdy = M, \qquad (13)$$

here Ω is the area of a cross-section. As is the convention in the theory of torsion:

$$\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 0, \qquad (14)$$

and the remaining components of the stress tensor are in accord with equilibrium equations (1) which are the following form taking into account (14):

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} = 0,\ \ \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_z}{\partial z} = 0. \qquad (15)$$

Compatibility equations (4) will look like

$$\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial x^2}=\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial y^2}=\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial z^2}=\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial x\partial y}=0,$$

$$(1+\nu)\Delta\tau_{xz}+\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial x\partial y}=0, \qquad (16)$$

$$(1+\nu)\Delta\tau_{yz}+\frac{\partial^2\sigma_z}{\partial y\partial z}=0.$$

From the equations (16) one can get

$$\sigma_z = Azy + Bzx + Dx + Ey + Fz + H, \qquad (17)$$

here *A*, *B*, *D*, *E*, *F*, *H* are arbitrary constants.

By substituting (17) into (13) on gets that $\sigma_z = 0$ in all alternate cross-sections of the rod. Therefore equations (15), (16) are reduced to the following:

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}=0, \qquad (18)$$

$$\Delta\tau_{xz}=0,\ \ \Delta\tau_{yz}=0. \qquad (19)$$

Let's transform the equations (18), (19). For this purpose we'll derive the equation (18) on *x* and subtract from it the first equation (19):

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}-\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}\right)=0. \qquad (20)$$

Now we'll derive the equation (18) on *y* and subtract from it the second equation (19).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}\right)=0. \qquad (21)$$

It follows from (19) and (20)

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=C, \qquad (22)$$

here *C* is an arbitrary constant.

A system (18), (19) may be replaced be equations (18) and (22).

As from (12) one can get

$$\tau_{xz}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right),\ \ \tau_{yz}=\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right), \qquad (23)$$

then

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=\mu\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}\right). \qquad (24)$$

It is known that $\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}\right)$ is the third component of the vector $\mathrm{rot}(u,v,w)$. We'll obtain

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=-2\mu\frac{\partial\omega_z}{\partial z}, \qquad (25)$$

here $\frac{\partial\omega_z}{\partial z}$ is the angle of a torsion per unit length of fiber of the rod. This angle is called twist and is denoted θ. From (25) and (22) one gets

$$C=-2\mu\frac{\partial\omega_z}{\partial z}=-2\mu\theta. \qquad (26)$$

We obtained finally that the problem of torsion of elastic prismatic rod comes to integration the following equations

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=0,\ \ \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=-2\mu\theta, \qquad (27)$$

with boundary conditions

$$\tau_{xz}l+\tau_{yz}m=0. \qquad (28)$$

As the equations (27) come to Poisson's equation then it is the base of numerous examples of solving the problem of torsion of elastic prismatic rods.

This fact leads to analogies which permit to reduce the problem (27), (28) to others mechanical problems which solution is described by the same equations. Here are some of them: membrane analogy, some fluid-flow analogies, electrodynamic analogy. One can introduce a term torsional hardness $C = M/\theta$.

It is considered, the bigger a torsional hardness the better a rod resists to the torsion.

It was shown that among all the prismatic rods with the same area of lateral face, the biggest torsional hardness belongs to a rod with a circular cross-section.

Moreover, it is proved that among all the prismatic rods with multiply connected cross-section of the defined area and the defined total area of holes, the rod with ring-shaped cross-section which is bounded by two concentric circles has the highest torsional hardness. These and other problems of the theory of torsion of elastic bodies one can find in [11].

Saint-Venant noted an interesting fact: the maximum tangential stress as a rule is achieved upon the lateral face of a rod in the points the closest to a center of gravity of a cross-section.

5. Elastic Bending of Bars. Let's consider a prismatic rod bending by two equal and opposite moments *M* in one of the principal plane (fig. 1).

The coordinate origin is in the centre of gravity of a cross-section, the plane *xz* is in the main plane of bending. One gets the following elementary solution of the equations (1) in case of absence of body forces:

$$\sigma_z=\frac{Ex}{R},\ \ \sigma_y=\sigma_x=\tau_{xy}=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0, \qquad (29)$$

here *R* is a radius of curvature of the bended rod; *E* is Young's modulus of stretch and compression.

Let's consider a common case of bending of a console with the constant cross-section, which is under the action of a force *P* applied to an end and which is parallel to one of a main axes of the cross-section (fig. 2).

Let's suppose that in console case, stresses allocate in a distance *z* from the fixed end in the same way as (29):

$$\sigma_z=\frac{P(l-z)x}{l}. \qquad (30)$$

Let's suppose now that in every point of the cross-sections tangential stresses τ_{xz} and τ_{yz} affected and the other components of the stress tensor $\sigma_x,\sigma_y,\tau_{xy}$ are equal to zero.

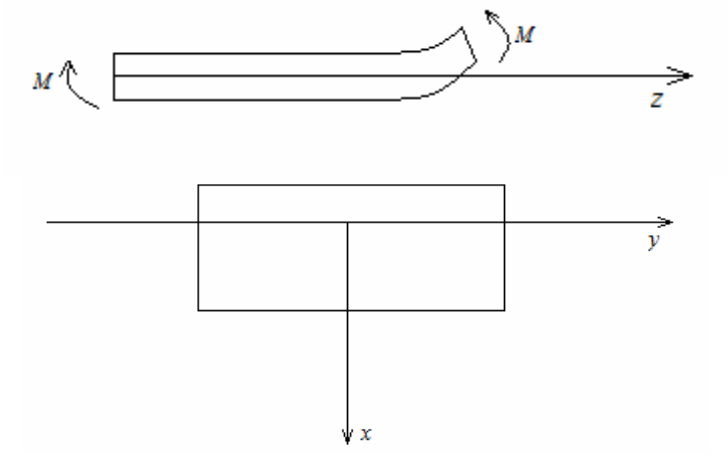


Fig. 1. Bending of a Bar

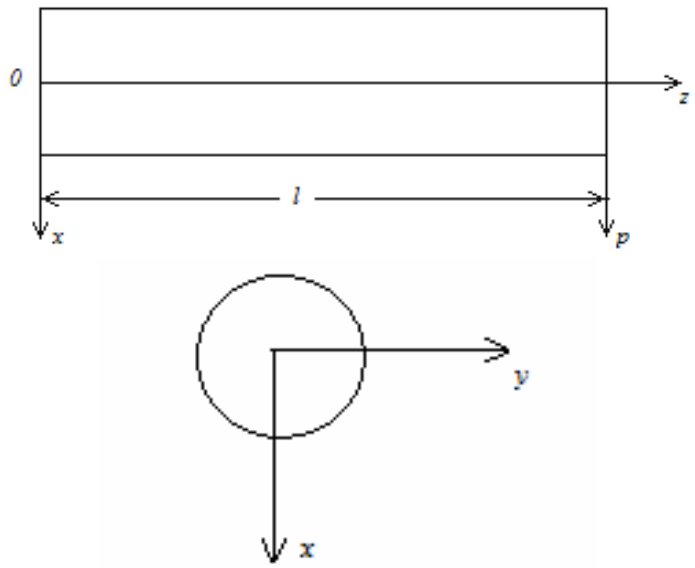


Fig. 2. Bending of a Console

By such suppositions, in case of absence of volume forces one gets from the equations (1)

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = -\frac{Px}{l}. \tag{31}$$

It is follows from (31) that tangent stresses do not depend on z, and they are the same for every cross-section.

The compatibility equations come to following:

$$\Delta \tau_{xz} = -\frac{P}{l(1+v)}, \quad \Delta \tau_{yz} = 0. \tag{32}$$

One gets in the same way as in the previous paragraph:

$$\begin{gathered} \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y}\right) = \frac{P}{l(1+v)}, \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x}\right) = 0. \end{gathered} \tag{33}$$

It is obtained from the formulas (33)

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} = -\frac{Py}{l(1+v)} + C,$$

here C is a constant. It is possible to show that $C = 0$ [11]. Then equations of the bending of console look like:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = -\dfrac{Px}{l}, \\ \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial y} - \dfrac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = -\dfrac{Py}{l(1+v)}. \end{cases} \tag{34}$$

One should add a boundary condition to these equations which is the following on the frontier of the contour

$$\tau_{xz} l + \tau_{yz} m = 0 .$$

6. A Plane Problem of Elasticity Theory. In this section the equations of a plane problem of elasticity theory in displacements are given and some boundary problems are posed.

For a plane problem the following conditions are valid:

$$u = u(x, y), \quad v = v(x, y), \quad w = 0.$$

Then from (3) one gets

$$F_1 = (\lambda + \mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) = 0,$$
$$F_2 = (\lambda + \mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) = 0. \quad (35)$$

The boundary conditions (5) look like

$$\sigma_x l + \tau_{xy} m = \left[(\lambda + \mu)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \mu \frac{\partial u}{\partial x}\right] l + \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) m = \overline{X},$$
$$\tau_{xy} l + \sigma_y m = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) l + \left[(\lambda + \mu)\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \mu \frac{\partial v}{\partial y}\right] m = \overline{Y}. \quad (36)$$

7. An Anti-plane Problem of Elasticity Theory. Let's consider equations (1), (2) when $u = v = 0$, $w = \omega(x, y)$. This case corresponds to so-called anti-plane elastic state.

Equations (1) come to

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0, \quad X = Y = 0,$$

and compatibility conditions for deformations come to equation

$$\partial_y \tau_{xz} - \partial_x \tau_{yz} = 0.$$

Let the elastic body be affected by only its dead weigh, then if the axis *Oz* is up-directed one receives $z = -\rho g$, here ρ is a constant density.

Finally equations describing elastic state on condition that the deformation is anti-plane look as follow

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \rho g = 0,$$
$$\frac{\partial}{\partial y}\tau_{xz} - \frac{\partial}{\partial y}\tau_{yz} = 0. \quad (37)$$

8. Conservation Laws for the Equations of Elasticity. Conservation laws are the fundamental laws of nature, they were determined in the beginning of the XXth century. A concept of the conservation laws appeared later after researches of E. Noether and her followings. The wide application of these laws to solving and investigations of some differential equations is relative to the last quarter of the XXth century. But significance and usefulness of this concept is not properly understood by majority of researchers even nowadays.

In this work the simplest definition of the conservation laws is given. For more details see [11] and cited literature there.

Let's $F_1 = 0$, $F_2 = 0$ is a system of two differential equations for two sought functions $u = u(x, y)$.

Definition. Conserved current for the system $F_1 = 0$, $F_2 = 0$, is a vector (A, B) which is

$$\frac{\partial}{\partial x} A + \frac{\partial}{\partial y} B = \Pi_1 F_1 + \Pi_2 F_2, \quad (38)$$

here Π_i are some differentiation operators. It is assumed that both of them are not equal to zero simultaneously.

Let's find conservation laws for equations from the sections 4–7.

1. The equations describing the elastic torsion (27) in convenient denotation look as follows

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = u_x + v_y = 0,$$
$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial y_x} = u_y - v_x = \alpha, \quad (39)$$

here $u = \tau_{xz}; v = \tau_{yz}; \alpha = -2\mu\theta$.

Let

$$A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1, \quad B = \alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^2, \quad (40)$$

where $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i$ are arbitrary functions of x, y.

From (38) with respect to (40) and (39) one obtains

$$\alpha^1_x u + \alpha^1 u_x + \beta^1_x v + \beta^1 v_x + \gamma^1_x + \alpha^2_y u + \alpha^2 u_y + \beta^2_y v + \beta^2 v_y + \gamma^2_y = \alpha^1(u_x + v_y) + \alpha^2(u_y - v_x - \alpha).$$

Here and further, subscript signifies a corresponding variable derivative.

One can get hence

$$\alpha^1 = \beta^2, \quad \beta^1 = -\alpha^2, \quad \gamma^1_x + \gamma^2_y = -\alpha^2\alpha,$$
$$\alpha^1_x + \alpha^2_y = 0, \quad \beta^1_x + \beta^2_y = 0.$$

Or after simple conversion

$$\alpha^2 = -\beta^1, \quad \beta^2 = \alpha^1,$$
$$\gamma^1_x + \gamma^2_y = -\alpha^2\alpha, \quad \alpha^1_x - \beta^1_y = 0, \quad (41)$$
$$\beta^1_x + \alpha^1_y = 0.$$

Therefore, a conserved current look as follows

$$A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1,$$
$$B = -\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2, \quad (42)$$

here (α^1, β^1) is a solution of the Cauchy–Riemann system; γ^1, γ^2 are determined from the equation (41).

With respect to (42) the conservation law may be defined in the following form

$$\int_\Gamma (\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1) dy - (-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2) dx = 0, \quad (43)$$

where Γ is an arbitrary piecewise smooth closed contour.

Let (x_0, y_0) a point inside the domain bounded by Γ. One can choose

$$\alpha^1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$
$$\beta^1 = -\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (44)$$

Let Γ_1 is a circle $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$ (fig. 3).

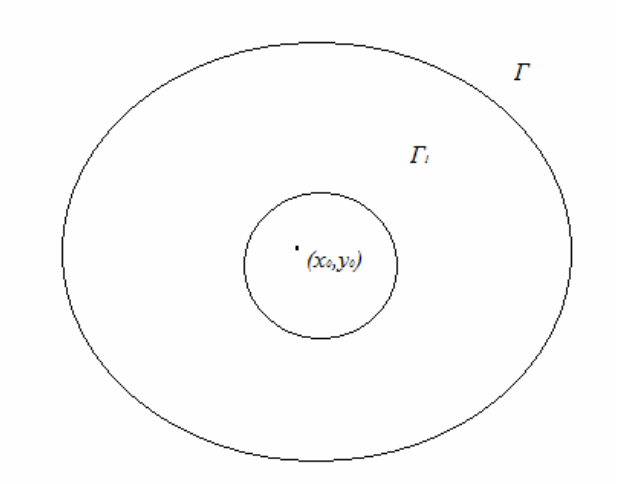


Fig. 3. A Circle Γ_1

It's not complicated to indicate that integral (44)

$$\int_\Gamma \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right) dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right) dx =$$
$$= -\int_{\Gamma_1} \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right) dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right) dx. \quad (45)$$

Let's calculate the circulation integral on Γ_1 using polar coordinates $x - x_0 = R\cos\theta$, $y - y_0 = R\sin\theta$:

$$\int_{\Gamma_1} \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right) dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right) dx =$$
$$= \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\cos\theta}{R} u - \frac{\sin\theta}{R} v + \gamma^1\right) R\cos\theta +\right.$$
$$\left. + \left(\frac{\sin\theta}{R} u + \frac{\cos\theta}{R} v + \gamma^2\right) R\sin\theta\right] d\theta =$$
$$= \int_0^{2\pi} \left[u + \gamma^1 R\cos\theta + \gamma^2 R\sin\theta\right] d\theta =$$
$$= \int_0^{2\pi} u\, d\theta + R\int_0^{2\pi} \left(\gamma^1\cos\theta + \gamma^2\sin\theta\right) d\theta.$$

In the last expression R tends to zero ($R \to 0$), and using mean-value one gets

$$\int_{\Gamma_1} \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right) dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right) dx = 2\pi u(x_0, y_0).$$

Now from (45)

$$u(x_0, y_0) =$$
$$= \frac{1}{2\pi}\int_\Gamma \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right) dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right) dx. \quad (46)$$

Let this time

$$\alpha^1 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = a^2,$$
$$\beta^1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \beta^2. \quad (47)$$

Let's calculate the circulation integral on Γ_1 in this case. In polar coordinates $x - x_0 = R\cos\theta$, $y - y_0 = R\sin\theta$:

$$\int_{\Gamma_1} = \int_0^{2\pi} \left\{\left[\frac{\sin\theta}{R} u + \frac{\cos\theta}{R} v + \gamma^1\right] R\cos\theta +\right.$$
$$\left. + \left[-\frac{\cos\theta}{R} u + \frac{\sin\theta}{R} v + \gamma^2\right] R\sin\theta\right\} d\theta =$$
$$= \int_0^{2\pi} \left[v + R\left(\gamma^1\cos\theta + \gamma^2\sin\theta\right)\right] d\theta.$$

On conditions that $R \to 0$ one obtains from the last formula and (46):

$$v(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi}\int_\Gamma \left(\alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^1\right) dy -$$
$$-\left(-\beta^2 u + \alpha^2 v + \gamma^2\right) dx. \quad (48)$$

Expressions (47) and (48) allow to calculate values u, v at any internal point of the domain enclosed by Γ if the values u, v on the contour are known. But $u = \tau_{xz}, v = \tau_{yz}$ therefore these two values are not known on Γ, it known only the expression $\tau_{xz} l + \tau_{yz} m = 0$. Hence formulas (47), (48) don't allow to calculate the values of the stress tensor inside the domain and then don't allow to solve the problem of the rod torsion. But as one will see later these formulas allow to resolve the elasto-plastic problem which is more complicated.

Remark. The similar formulas can be obtained easily for the equations of anti-plane theory of elasticity, which is given in the section 7.

Equations describing the torsion of a bar have a form (34). Let us assume in these equations

$$u = \tau_{xz}, \; v = \tau_{yz},$$
$$-P\, x/l = \omega_1, \; -P\, y/l(1+v) = \omega_2,$$

then

$$u_x + v_y = \omega_1, \; u_x - v_y = \omega_2. \quad (49)$$

The conserved current for this system will be found in a form

$$A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1,$$
$$B = \alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^2, \quad (50)$$

here $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i$ are fuctions of x, y only.

Analogously to the previous clause, one can get

$$A_x + B_y = \alpha^1_x u + \alpha^1 u_x + \beta^1_x v + \beta^1 v_x + \gamma^1_x +$$
$$+ \alpha^2_y u + \alpha^2 u_y + \beta^2_y v + \beta^2 v_y + \gamma^2_y =$$

$$= \alpha^1\left(u_x + v_y - \omega_1\right) + \alpha^2\left(u_y - v_x - \omega_2\right).$$

One can obtain from here

$$\alpha^1 = \beta^2,\ \beta^1 = -\alpha^2,\ \gamma_x^1 + \gamma_y^2 = -\alpha^1\omega_1 - \alpha^2\omega_2,$$

$$\alpha_x^1 + \alpha_y^2 = 0,\ \beta_x^1 + \beta_y^2 = 0.$$

After not complicated calculations

$$\alpha^2 = -\beta^1,\ \beta^2 = \alpha^1,$$

$$\gamma_x^1 + \gamma_y^2 = -\alpha^1\omega_1 - \alpha^2\omega_2, \tag{51}$$

$$\alpha_x^1 - \beta_y^1 = 0,\ \beta_x^1 + \alpha_y^1 = 0.$$

Hence, the conserved current looks like

$$A = \alpha u + \beta v + \gamma^1,$$
$$B = -\beta u + \alpha v + \gamma^2, \tag{52}$$

here $(\alpha,\ \beta)$ is an arbitrary solution of Cauchy–Riemann equations; γ^1, γ^2 are determined from the equation (52).

For the current (52) a conservation law can be written as follows

$$\int_\Gamma \left(\alpha u + \beta v + \gamma^1\right)dy - \left(-\beta u + \alpha v + \gamma^2\right)dx = 0.$$

Acting much as the previous clause one can obtain finally

$$u(x_0.y_0) = \frac{1}{2\pi}\int_\Gamma \left(\alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1\right)dy - \left(-\beta^1 u + \alpha^1 v + \gamma^2\right)dx,$$

$$v(x_0.y_0) = \frac{1}{2\pi}\int_\Gamma \left(\alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^1\right)dy - \left(-\beta^2 u + \alpha^2 v + \gamma^2\right)dx.$$

Remarks of the previous item are also correct for this problem.

Conservation laws of the plane theory of elasticity.

Let's find some conservation laws for equations describing 2-dimensional resilience (35) as it is in the work [12]. The conserved current is looked for in a form

$$A = \alpha_1(\lambda + 2\mu)u_x + \beta_1\mu u_y + \gamma_1\mu v_x + (\lambda + 2\mu)\delta_1 v_y,$$

$$B = \alpha_2 u_x + \beta_2 u_y + \gamma_2 v_x + \delta_2 v_y,$$

here $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$, some functions of x, y.

From the relation

$$\frac{\partial}{\partial x}A + \frac{\partial}{\partial y}B = \alpha_1 F_1 + \gamma_1 F_2. \tag{53}$$

From (53) one can obtain

$$\alpha_2 = -\beta_1 + (\lambda + \mu)\gamma_1,$$

$$\beta_2 = \alpha_1\mu,\ \gamma_2 = -\delta_1 + (\lambda + \mu)\alpha_1, \tag{54}$$

$$\delta_2 = (\lambda + 2\mu)\gamma_1,$$

$$(\lambda + 2\mu)\frac{\partial\alpha_1}{\partial x} + \frac{\partial\alpha_2}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial\beta_1}{\partial x} + \frac{\partial\beta_2}{\partial y} = 0,\ \mu\frac{\partial\gamma_1}{\partial x} + \frac{\partial\gamma_2}{\partial y} = 0, \tag{55}$$

$$\frac{\partial\delta_1}{\partial x} + \frac{\partial\delta_2}{\partial y} = 0.$$

Making substitution of (54) into (55) one can get

$$(\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\alpha_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\gamma_1}{\partial x\partial y}(\lambda + \mu) + \mu\frac{\partial^2\alpha_1}{\partial y^2} = 0,$$

$$\mu\frac{\partial^2\gamma_1}{\partial x^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2\alpha_1}{\partial x\partial y} + (\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\gamma_1}{\partial y^2} = 0,$$

or

$$(\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\beta_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\delta_1}{\partial x\partial y}(\lambda + \mu) + \mu\frac{\partial^2\beta_1}{\partial y^2} = 0,$$

$$\mu\frac{\partial^2\delta_1}{\partial x^2} + (\lambda + \mu)\frac{\partial^2\beta_1}{\partial x\partial y} + (\lambda + 2\mu)\frac{\partial^2\delta_1}{\partial y^2} = 0.$$

It means that (α_1, γ_1) and (β_1, δ_1) are arbitrary solutions of the equations (35) which are coupled by correlations (55). This fact permits to construct an infinite system of conservation laws on a base of the exact solutions of equations of elasticity.

9. Conservation Laws of Two-dimensional Equations of Plasticity. Let us consider the following equations of two-dimensional plane theory of plasticity which can be obtained with ease from the equation of the section 2:

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} - 2k\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\cos 2\theta + \frac{\partial\theta}{\partial y}\sin 2\theta\right) = 0, \tag{56}$$

$$\frac{\partial\sigma}{\partial y} - 2k\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\sin 2\theta - \frac{\partial\theta}{\partial y}\cos 2\theta\right) = 0. \tag{57}$$

Here σ is a hydrostatic pressure, $\theta = (1, x) - \frac{\pi}{4}$, $(1, x)$ is an angle between the main direction of the stress tensor and the axis *Ox*.

Let's find conservation laws of a system (86), (57) in the form $C = C(\sigma, \theta)$ for which equality

$$\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial D}{\partial y} = 0$$

or owing to Green's formula

$$\oint_\Gamma D dx - C dy = 0 \tag{58}$$

is correct on account of system, i. e. relation

$$\frac{\partial C}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial\theta\partial x} + \frac{\partial D}{\partial\sigma}\frac{\partial\sigma}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial\theta}\frac{\partial\theta}{\partial y} = 0 \tag{59}$$

has to be performed for all its solutions in a domain bounded by the smooth contour Γ.

Let's determine a system of plasticity in a normal matrix form [5]:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial\sigma}{\partial x} \\ \frac{\partial\theta}{\partial x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta} & -\frac{2k}{\sin 2\theta} \\ -\frac{1}{2k\sin 2\theta} & -\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \frac{\partial\sigma}{\partial y} \\ \frac{\partial\theta}{\partial y} \end{pmatrix} = 0. \tag{60}$$

Multiplying this system by the vector $\left(\frac{\partial C}{\partial \sigma}, \frac{\partial C}{\partial \theta}\right)$ one can get the following equation

$$\frac{\partial C}{\partial \sigma}\frac{\partial \sigma}{\partial x}+\frac{\partial C}{\partial \theta}\frac{\partial \theta}{\partial x}-\left(\frac{\partial C}{\partial \sigma}\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta}+\frac{\partial C}{\partial \theta}\frac{1}{2k\sin 2\theta}\right)\frac{\partial \sigma}{\partial y}- \\ -\left(\frac{\partial C}{\partial \sigma}\frac{2k}{\sin 2\theta}+\frac{\partial C}{\partial \theta}\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta}\right)\frac{\partial \theta}{\partial y}=0. \quad (61)$$

Comparing the equations (60) and (61) it is possible to obtain two exppressions for the functions C and D:

$$\frac{\partial D}{\partial \sigma}=-\frac{\partial C}{\partial \sigma}\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta}-\frac{\partial C}{\partial \theta}\frac{1}{2k\sin 2\theta}, \\ \frac{\partial D}{\partial \theta}=-\frac{\partial C}{\partial \sigma}\frac{2k}{\sin 2\theta}-\frac{\partial C}{\partial \theta}\frac{\cos 2\theta}{\sin 2\theta}. \quad (62)$$

Let's express the components $\frac{\partial C}{\partial \theta}, \frac{\partial D}{\partial \theta}$ of the linear system (62) in an explicit form:

$$\frac{\partial C}{\partial \theta}+2k\left(\frac{\partial D}{\partial \sigma}\sin 2\theta+\frac{\partial C}{\partial \sigma}\cos 2\theta\right)=0, \\ \frac{\partial D}{\partial \theta}-2k\left(\frac{\partial D}{\partial \sigma}\cos 2\theta-\frac{\partial C}{\partial \sigma}\sin 2\theta\right)=0. \quad (63)$$

It is possible to remark that by substitution $C=-y(\sigma,\theta)$, $D=x(\sigma,\theta)$, the system (63) coincides with a linearized plasticity system

$$y_\theta-2k\left(-y_\sigma\cos 2\theta+x_\sigma\sin 2\theta\right)=0, \\ x_\theta-2k\left(y_\sigma\sin 2\theta+x_\sigma\cos 2\theta\right)=0. \quad (64)$$

This fact permits to use all the proprieties of this system during the conservation laws construction.

Thus, the linearization of the plasticity system is achieved without the requirement of the non being zero to Jacobian.

Further using the substitution

$$\xi=\sigma+2k\theta, \quad \eta=\sigma-2k\theta,$$

the system (63) comes to equations:

$$\frac{\partial D}{\partial \xi}-\frac{\partial C}{\partial \xi}\mathrm{tg}\theta=0, \\ \frac{\partial D}{\partial \eta}+\frac{\partial C}{\partial \eta}\mathrm{ctg}\theta=0. \quad (65)$$

If insert new independent functions φ, ψ

$$\varphi=D-\mathrm{tg}\theta C, \\ \psi=D+\mathrm{ctg}\theta C, \quad (66)$$

it is possible to obtain the system

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \xi}-\frac{1}{2}\mathrm{tg}\theta\left(\psi-\varphi\right)=0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \eta}+\frac{1}{2}\mathrm{ctg}\theta\left(\psi-\varphi\right)=0. \quad (67)$$

Finally, by setting $\rho=\varphi\cos\theta$ one can come to equation:

$$\rho_{\xi\eta}-\frac{\rho}{4}=0. \quad (68)$$

And this is the well-known telegraph equation.

Thereby the construction of conservation laws for the plasticity equations comes to solving of the linear systems for which a lot of methods of resolution of equations and boundary problems are developed.

10. Elasto-plastic Boundary of a Twisted Straight Rod. Let's consider an elasto-plastic torsion of a straight rod which cross-section is bounded by a convex contour Γ.

If the twisting moment is rather significant, a plastic domain P forms in the rod. This domain arises on the external contour Γ. Suppose that the plastic domain is covered completely by the contour. In this case in the cross-section two domains appear, a plastic one P and an elastic one F. L is a boundary of these domains (fig. 4).

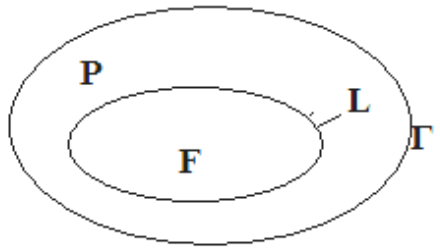


Fig. 4. Cross-section of the Twisted Rod

There are a lot of works devoted to solution of the problem of the stressed state of an elasto-plastic rod, but most of them are based on some assumptions concerning the form of boundary L which is not known in advance. A novel method of the determination of unknown boundary is proposed by B. D. Annin [1]. This method is based on contact transformations and it permits to define the boundary between elastic and plastic domains in the rods with oval cross-section. This problem one can find in [1] and in the bibliography cited there.

In the present work the stress state is defined in all internal points of the rod by means of conservation laws, and formulas for analytical calculations of these stresses are proposed in the case of a piecewise-smooth directed boundary of the cross-section. The conservation laws is used for a long time in a fruitful way for solving of various mathematical and mechanical problems. A summary of results and solved problems in different domains of mechanics can be found in [4; 5; 7].

Problem Definition

Let τ_{xz}, τ_{yz} are single non-zero components of the stress tensor. In the elastic domain they satisfy the equilibrium equation

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}=0 \quad (69)$$

and the equations

$$\tau_{xz}=G\theta\left(\frac{\partial \psi}{\partial x}-y\right), \quad \tau_{yz}=G\theta\left(\frac{\partial \psi}{\partial y}+x\right). \quad (70)$$

Here function $\theta\psi(x,y)$ determines a deplanation warpingof the cross-section, θ is a constant, G is a Young modulus by shear.

Let's introduce the stress function φ as following

$$\tau_{xz} = \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} \tag{71}$$

then to determine of φ in the elastic domain one can get the equation

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = a, \tag{72}$$

here $a = -2G\theta$ is non-zero constant.

In the plastic domain the components τ_{xz}, τ_{yz} along with the equilibrium equation satisfy the plasticity condition

$$\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = 1. \tag{73}$$

Here, to simplify the further calculations, the plasticity constant equals to one.

By introducing the stress function in this equation one can get

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 = 1. \tag{74}$$

Boundary Conditions. Let the lateral surface be free from stresses. It means that $\frac{\partial\varphi}{\partial l} = 0$ on the contour Γ. Here $\vec{l} = (l_1, l_2)$ is a tangent vector to the contour Γ. It follows that $\varphi = \text{const}$ among the contour. As Γ is a simply connected contour then $\varphi = 0$ on it.

Finally one gets the following problem.

It is necessary to resolve the following equation in the domain bounded by the curve *L*:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = a. \tag{75}$$

In the domain bounded by curves *L* and Γ, i. e. in the plastic domain, the function φ satisfies the equation

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2 = 1. \tag{76}$$

The following conditions apply on the contour Γ for the function φ

$$\varphi = 0, \tag{77}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial l} = 0 \text{ or } \frac{\partial\varphi}{\partial x} l_1 + \frac{\partial\varphi}{\partial y} l_2 = 0, \tag{78}$$

on the frontier *L* the function φ is continued.

It is necessary to find φ in elastic and plastic domains and to determine a frontier *L*.

Let's introduce the denotation $\varphi_x = u$, $\varphi_y = v$. Then equations (75), (76) come to

$$F_1 = u_x + v_y - a = 0. \tag{79}$$

$$u^2 + v^2 = 1. \tag{80}$$

Owing to the denotation the following equality occurs:

$$F_2 = u_y - v_x = 0. \tag{81}$$

Definition. A vector (*A*, *B*) is a conserved current for the system of the equations (79), (81) if there is the following correlation

$$\partial_x A + \partial_y B = \Delta_1 F_1 + \Delta_2 F_2 = 0. \tag{82}$$

Here Δ_1, Δ_2 are some linear differential operators.

It means that for functions *A* and *B* the conservation is correct law for all solutions of the system (79), (81):

$$\partial_x A + \partial_y B = 0. \tag{83}$$

The conservation law (83) owing to the equations (79), (77) look like

$$A_x + A_u u_x + A_v v_x + B_y + B_u u_y + B_v v_y = 0$$

or taking into account $u_x = a - v_y$ and $u_y = v_x$,

$$A_x + A_u a + A_v v_x + B_y + B_u v_x + B_v v_y = 0.$$

From the last expression follows that functions *A* and *B* satisfy the equations

$$A_x + A_u a + B_y = 0, \tag{84}$$

$$B_v - A_u = 0, \quad A_v + B_u = 0. \tag{85}$$

(84), (85) are Cauchy–Riemann equations.

Let's consider a domain *D* with the boundary Γ on condition that plastic domain *P* comprises completely the elastic domain *F*. Let Γ be a smooth directed contour, i. e. continuously differentiable without singular points.

It follows from the conservation law

$$\iint_D \left(\partial_x A + \partial_y B\right) dxdy = 0. \tag{86}$$

From (86), using Green's formula one can obtain

$$\oint_\Gamma Ady - Bdx = 0. \tag{87}$$

Our objective is to find a domain *F* belonging with its boundary to the domain *D* where inequality $u^2 + v^2 < 1$ applies.

Let $A = \alpha u + \beta v$, $B = \alpha v - \beta u + \gamma$ then

$$A_x = \alpha_x u + \beta_x v + \beta v_x, \tag{88}$$

$$B_y = \alpha_y v + \alpha v_y - \beta_y u - \beta u_y + \gamma_y. \tag{89}$$

According to the conservation law (83) one can get the equation

$$\begin{aligned} A_x + B_y = \alpha_x u + \alpha u_x + \beta_x v + \beta v_x + \\ + \alpha_y v + \alpha v_y - \beta_y u - \beta u_y + \gamma_y = 0, \end{aligned} \tag{90}$$

which contains conditions on functions α, β and γ.

$$\begin{cases} \alpha_x - \beta_y = 0, \\ \beta_x + \alpha_y = 0, \\ a\alpha + \gamma_y = 0. \end{cases} \tag{91}$$

Let's consider two solutions of the system (90)

The first one is

$$\alpha_1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\beta_1 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \tag{92}$$

$$\gamma_{1y} = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

then

$$\gamma_1 = -a \cdot \operatorname{arctg} \frac{y - y_0}{x - x_0}. \tag{93}$$

Respectively, the second one is

$$\alpha_2 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\beta_2 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \tag{94}$$

$$\gamma_{2y} = -a \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

then $\gamma_2 = -\frac{a}{2} \cdot \ln\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\right)$.

Let's note the equation (87) for the functions A and B

$$\begin{aligned}
&\oint_\Gamma A dy - B dx = \oint_\Gamma (\alpha u + \beta v) dy - (\alpha v - \beta u + \gamma) dx = \\
&= \oint_\Gamma \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1} + \beta\right) v dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2} - \beta\right) u dx - \oint_\Gamma \gamma dx = \\
&= \oint_\Gamma \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1} + \beta\right) \frac{\partial \varphi}{\partial y} dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2} - \beta\right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx - \oint_\Gamma \gamma dx = \\
&= \oint_\Gamma \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1}\right) v dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2}\right) dx - \\
&- \oint_\Gamma \gamma dx + \oint_\Gamma \beta \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx\right) = \\
&= \oint_\Gamma \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = 0.
\end{aligned} \tag{95}$$

Let's decompose the boundary Γ into parts, i. e. $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$; Γ_3 is a circle $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$ (fig. 5).

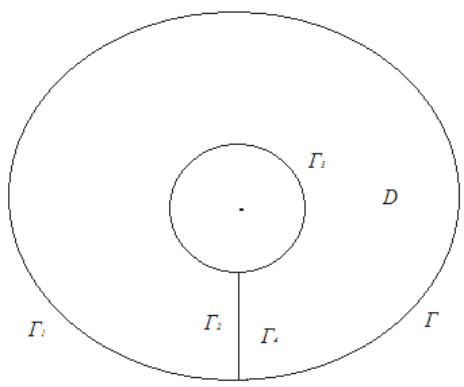


Fig. 5. Boundary Γ

In this case

$$\begin{aligned}
&\oint_\Gamma A dy - B dx = \oint_\Gamma \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \\
&= \oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_2} \alpha u dy - \\
&- (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_3} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \\
&+ \oint_{\Gamma_4} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = 0.
\end{aligned} \tag{96}$$

Obviously, $\oint_{\Gamma_2} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_4} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = 0$. Taking into account this condition the equation (93) looks like

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = -\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx. \tag{97}$$

Let's calculate an integral $\oint_{\Gamma_1}$, Γ_1 is a circle of the radius R.

Let

$$\alpha = \alpha_1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\beta = \beta_1 = -\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \tag{98}$$

$$\gamma = \gamma_1 = -a \cdot \operatorname{arctg} \frac{y - y_0}{x - x_0}.$$

Introduce the polar coordinate system

$$\begin{cases} x - x_0 = R \cos \varphi \\ y - y_0 = R \sin \varphi \end{cases}, \tag{99}$$

then

$$\begin{cases} dx = R \sin \varphi d\varphi \\ dy = R \cos \varphi d\varphi \end{cases},$$

$$\alpha = \frac{\cos \varphi}{R}, \quad \beta = -\frac{\sin \varphi}{R}, \quad \gamma = -a\varphi. \tag{100}$$

As a result with $R \to 0$ one obtains

$$\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \pi u(x_0, y_0). \tag{101}$$

Analogically using $\alpha = \alpha_2$, $\beta = \beta_2$, $\gamma = \gamma_2$

$$\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \pi u(x_0, y_0). \tag{102}$$

Finally one can get from (82)

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha_1 u dy - (\alpha_1 v + \gamma_1) dx = \pi u(x_0, y_0), \tag{103}$$

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha_2 u dy - (\alpha_2 v + \gamma_2) dx = \pi u(x_0, y_0). \tag{104}$$

Let's determine the curve Γ_3 in parametric form:

$$x = f(t), \quad y = \varphi(t), \quad 0 \le t \le T, \tag{105}$$

$f'(t)$, $\varphi'(t)$ are derivatives of the functions $f(t)$ and $\varphi(t)$ respectively.

Hen functions $u(x_0, y_0)$, $v(x_0, y_0)$ from (98), (102) are found from the formulas

$$u(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi}\int_0^T \left(\frac{(f(t)-x_0)\sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t)-x_0)^2 + (\varphi(t)-y_0)^2}} + \right.$$

$$\left. + af'(t)\operatorname{arctg}\frac{\varphi(t)-y_0}{f(t)-x_0} \right) dt; \tag{106}$$

$$v(x_0, y_0) = \frac{1}{\pi}\int_0^T \left(\frac{(\varphi(t)-y_0)\sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t)-x_0)^2 + (\varphi(t)-y_0)^2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{a}{2} f'(t)\ln\left((f(t)-x_0)^2 + (\varphi(t)-y_0)^2 \right) \right) dt.$$

The solutions (102) and (103) were used respectively to obtain these relations.

Let's calculate now a value of the expression

$$u^2 + v^2 \tag{107}$$

in a point (x_0, y_0). The points where (107) is greater than or equal to one belong to the plastic domain, the points where the expression (107) is less than one belong to the elastic domain.

On the base of the formulas (103), (104) the programs were developed; they permit to construct plastic and elastic domains in a twisted rod with indicated accuracy.

The solutions obtained using the programs coincident rather well with the known solutions.

In this journal one can find some examples of calculation of elasto-plastic boundaries for some cross-section of the rolling section. These results belong to A. V. Kondrin and to the authors of the article. The article [13] gives examples of the calculation of elastic – plastic rods borders for rolling profile.

11. Elasto-plastic Boundary in the Bended Consol. Let's consider a consol with the permanent cross-section bounded by the contour Γ. The consol is under the concentrated force *P* on a free end in parallels to principal axes (fig. 6).

Let the component σ_z of the stress tensor is distributed along the consol as in the case of pure bending

$$\sigma_z = -\frac{p(i-z)x}{l}.$$

Let components of the stress tensor are

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{xy} = 0.$$

Then the residual components of the stress tensor satisfy the equations

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial x} = -\frac{px}{l}. \tag{108}$$

Usually the equations (108) replace by two compatibility equations

$$\Delta\tau_{xz} = -\frac{p}{l(1+v)}, \quad \Delta\tau_{yz} = 0,$$

here Δ is the Laplacian, v is a Poisson's ratio. This system is usually resolved by semi-inverse Saint-Venant method.

Let's rewrite the system (108) in terms of the vector of deformations (*u*; *v*; *w*). A boundary problem will be posed and resolved using conservation laws.

Using the formulas (2) which connect components of the stress tensor and strain tensor one can get

$$\sigma_x = \lambda\varepsilon + 2\mu\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \ \sigma_y = \lambda\varepsilon + 2\mu\frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$\sigma_z = \lambda\varepsilon + 2\mu\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{p(l-z)}{l} = \sigma,$$

$$\tau_{xy} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) = 0, \ \tau_{xz} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) = \tau_1, \tag{109}$$

$$\tau_{yz} = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) = \tau_2,$$

here λ, μ are Lamé coeffisients, $\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$, τ_1, τ_2 are sought functions of *x*, *y*.

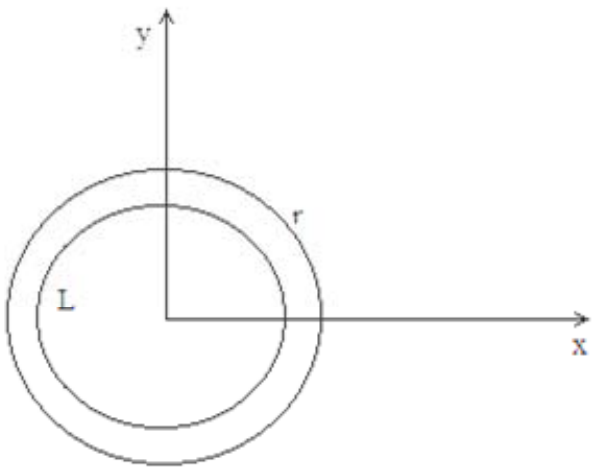


Fig. 6. Elasto-plastic Boundary in the Cross-section of the Consol

From the first, the second and the third equation one can get

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A_1 xz + B_1 x, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = A_2 xz + B_2 x,$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = A_3 xz + B_3 x, \qquad (110)$$

here constants A_i, B_i can be evaluated with ease per λ, μ, p, l.

From the equations (110) one can get

$$w = \frac{A_3 xz^2}{2} + B_3 xz + \omega(x, y),$$

$$u = -\frac{A_3 z^3}{\sigma} - \frac{B_3 z^3}{2} + \left(\tau_1 / \mu - \omega_x\right) z + U(x, y),$$

$$v = \left(\tau_2 / \mu - \omega_y\right) + V(x, y),$$

here ω, U, V are sought functions.

From the relation $\tau_{xy} = 0$ one gets

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left(\tau_1 y / \mu - \omega_{xy}\right) z + U_y + \left(\tau_2 x / \mu - \omega_{xy}\right) + V_x = 0.$$

Relations

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\left(\partial \tau_{1x} / \mu - \omega_{xx}\right) z + U_x = A_1 xz + B_1 x,$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \left(\partial \tau_{2y} / \mu - \omega_{yy}\right) z + U_y = A_2 xz + B_2 x$$

are substituted in the previous equation; the result is

$$\mu\left(\omega_{xx} + A_1 x\right) + \mu\left(\omega_{yy} + A_2 x\right) = -\frac{Px}{l}.$$

Suppose that the lateral surface of the beam if free from the stresses. It means that

$$\tau_{xz} n_2 - \tau_{yz} n_1 = 0, \qquad (111)$$

here (n_1, n_2) are an external normal line to the contour Γ. Suppose also that the plastic flow begins from the external side of the lateral surface of the beam. In this case the plasticity condition of Von Mises looks like

$$\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = k^2, \qquad (112)$$

here k is a constant of plasticity. Solving the system (111), (112) one can get

$$\tau_{xz} = \pm n_1 k, \quad \tau_{yz} = \pm n_2 k.$$

Choosing the upper sign in these relations, one can pose the following problem.

It is necessary to resolve the equation

$$\omega_{xx} + \omega_{yy} = ax, \qquad (113)$$

under the following conditions on Γ:

$$\omega_x = \frac{\left(n_1 k - \frac{A_1 x^2}{2}\right)}{\mu}, \quad \omega_y = -\frac{\left(n_2 k - A_2 xy\right)}{\mu}. \qquad (114)$$

Remark. There are two domains in the cross-section of the beam, a plastic one and an elastic one. If the following condition satisfies in a point of the cross-section

$$\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 \langle 1,$$

Then the point falls into the elastic domain. The other points including the boundary of the contour Γ belong to the plastic domain.

The relation of a form

$$\partial_x A + \partial_y B = 0, \qquad (115)$$

is called a conservation law of (115) for the equation (113) if the equation (115) is correct for all solutions of the equation (113). Let the conserved current looks like

$$A = \alpha(x, y)\omega_x + \beta(x, y)\omega_y + \gamma(x, y),$$

$$B = \alpha^1(x, y)\omega_x + \beta^1(x, y)\omega_y + \gamma^1(x, y).$$

One can obtain from (113) and (115)

$$\begin{aligned} &\alpha\left(a - \omega_{yy}\right) + \alpha_x \omega_x + \beta\omega_{xy} + \beta_x \omega_y + \gamma_x + \\ &+ \alpha^1 \omega_{xy} + \alpha_y^1 \omega_x + \beta^1 \omega_{yy} + \beta_y^1 \omega_y + \gamma_y^1 0. \end{aligned} \qquad (116)$$

The relation (116) is correct for all solutions of the equation (113) therefore it is follows from (116)

$$\alpha_x - \beta_y = 0, \quad \beta_x + \alpha_y = 0, \quad \alpha a + \gamma_x + \gamma_y^1 = 0. \qquad (117)$$

The conservation law (115) can be written using the Green's formula:

$$\int -\left(\alpha\omega_x + \beta\omega_y + \gamma\right) dy + \left(-\beta\omega_x + \alpha\omega_y + \gamma^1\right) dx = 0.$$

Let's consider two solutions of the equations (117).

The first one is the following

$$\alpha^1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \beta^1 = -\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\gamma_x = 0, \quad \alpha^1 xa = -\gamma_y^1, \quad \gamma^1 = -ax \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{y - y_0}{x - x_0}\right).$$

The second one looks like

$$\alpha^2 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \beta^2 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

$$\gamma_y^2 = 0, \quad \alpha^2 xa = -\gamma_x.$$

Using the conservation law and applying it to the contour represented on the fig. 6 one can obtain on the analogy with the previous section

$$\int \left(\alpha\omega_x + \beta\omega_y + \gamma\right) dy - \left(-\beta\omega_x + \alpha\omega_y + \gamma^1\right) dx =$$

$$= -\int_{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2} \left(\alpha\omega_x + \beta\omega_y + \gamma\right) dy -$$

$$-\left(-\beta\omega_x + \alpha\omega_y + \gamma^1\right) dx.$$

Let's calculate the second integral for the first and the second solutions of the equation (117). As a result the formulas for finding of $\omega_x(x_0, y_0)$, $\omega_y(x_0, y_0)$ are obtained.

These formulas permit to find a stress state in any point (x_0, y_0). It means that it is possible to determine for every point of the domain its belonging to either elastic or plastic zone.

The expounded method allow to construct a boundary between an elastic and a plastic domains with any prescribed accuracy using the computer. Preliminary calculations confirm this conclusion.

12. Elasto-plastic Boundaries for Large Areas. In this section only domains with smooth convex boundaries are regarded.

Let's consider a domain bounded by the contour Γ (fig. 7).

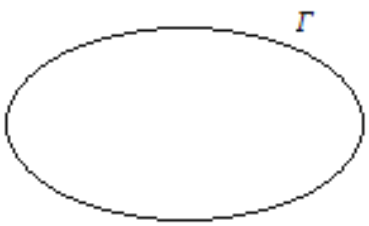


Fig. 7. Domain with the Contour Γ

Let boundary conditions (5) applies on Γ. They will look like

$$\sigma_x l + \tau_{xy} m = \overline{X}, \quad \tau_{xy} l + \sigma_y m = \overline{Y}, \tag{118}$$

Moreover, suppose that the loadings (118) bring the entire boundary and the nearby points to the plastic state. Then it is possible to introduce variables σ, θ by the following way

$$\sigma_x = \sigma - k\cos 2\theta, \ \sigma_y = \sigma + k\cos 2\theta, \ \tau_{xy} = k\sin 2\theta. \tag{119}$$

In this case conditions (118) look like

$$(\sigma - k\cos 2\theta) l + k\sin 2\theta m = \overline{X},$$
$$k\sin 2\theta l + (\sigma + k\cos 2\theta) m = \overline{Y}.$$

These conditions can be written as

$$\sigma = \overline{X}', \quad \theta = \overline{Y}'. \tag{120}$$

Thus, one gets the Cauchy problem on the boundary Γ in the plastic domain. Solving this problem using formulas of the section 9, one obtains two families of characteristic curves (fig. 8).

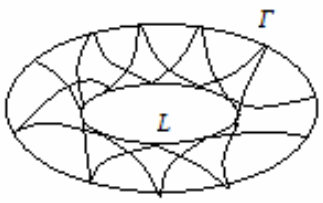


Fig. 8. Characteristic Curves

For these curves one can construct an envelope curve *L*. This line is the sought elasto-plastic boundary. It is enough to solve an elastic problem inside the domain to resolve completely elasto-plastic problem.

It is possible to set Cauchy problem for the system of plasticity (56), (57).

Let on the contour curve Γ denominated as *SP* there are starting data:

$$\sigma|_{SP} = \sigma_0', \quad \theta|_{SP} = \theta_0'. \tag{121}$$

Let describe a characteristic curve $PR: \eta_0 = \text{const}$ from the point *P* and a characteristic curve $RS: \xi_0 = \text{const}$ from the point *S*. Then a solution of Cauchy problem is determined in a curvilinear triangle ΔSPR (fig. 9).

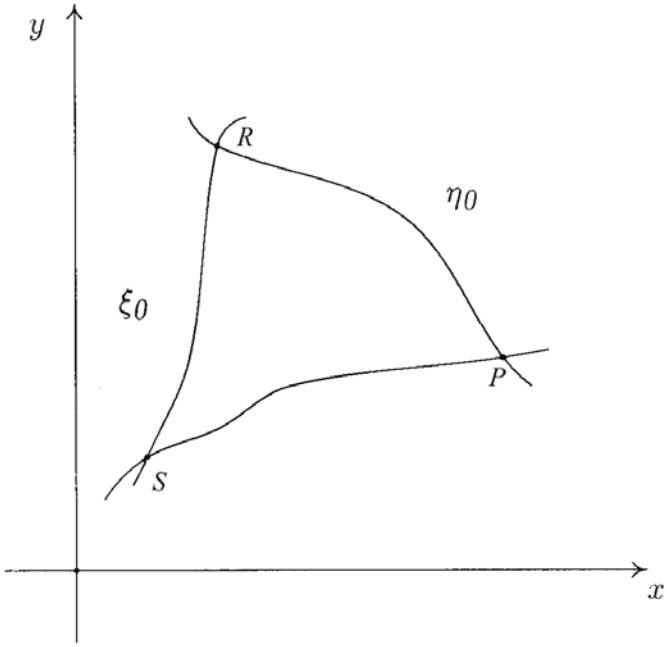


Fig. 9. Cauchy Problem

Thus it is necessary to find coordinates of a cross point R of the characteristic curves. If the coordinates of the point $R(x_R, y_R)$ and values ξ_0, η_0 of are known then it is possible to find values of functions σ, θ.

One can calculate an integral over the closed contour *SPR*. Using the correlation (58) in the Stokes theorem for a plane [11], one can conclude that this integral is equal to zero:

$$\int_{SPR} Ddx - Cdy = \int_{SP} + \int_{PR:\eta=\eta_0} + \int_{RS:\xi=\xi_0} = 0.$$

1. For the coordinate x_R one can get:

$$\int_{SPR} Ddx - Cdy = \int_{SPR} \left(D - C\frac{dy}{dx} \right) dx.$$

Integrals $\int_{PR:\eta=\eta_0}$ and $\int_{RS:\xi=\xi_0}$ are integrated by parts:

$$\int_{PR} \left(D - C\frac{dy}{dx} \right) dx = \int_{PR} \left(D + C\mathrm{ctg}\theta \right) dx =$$

$$= \int_{PR} \psi dx = x\psi\Big|_{x=x_P}^{x=x_R} - \int_{PR} x\frac{\partial\psi}{\partial\xi} d\xi,$$

$$\int_{RS} \left(D - C\frac{dy}{dx} \right) dx = \int_{RS} \left(D - C\mathrm{ctg}\theta \right) dx =$$

$$= \int_{RS} \varphi dx = x\varphi_{x=x_R}^{x=x_S} - \int_{RS} x\frac{\partial\varphi}{\partial\eta} d\eta.$$

Assuming $\varphi = 1$, $\psi = 0$ one can get the boundary conditions for the system (65) in the form:

$$\varphi\big|_{RS} = 1', \quad \psi\big|_{PR} = 0'. \qquad (122)$$

Under such assumption the final expression for the coordinate x_R looks like:

$$\int_{SPR} Ddx - Cdy = \int_{SP} \left(Ddx - Cdy \right) + x\psi\Big|_{x=x_P}^{x=x_R} + x\varphi\Big|_{x=x_R}^{x=x_S} = 0,$$

$$x_R = \int_{SP} \left(Ddx - Cdy \right) + x_S'. \qquad (123)$$

2. Similarly fort the coordinate y_R:

$$\int_{SPR} Ddx - Cdy = \int_{SPR} \left(D\frac{dx}{dy} - C \right) dy.$$

Integrals $\int_{PR:\eta=\eta_0}$ and $\int_{RS:\xi=\xi_0}$ are integrated by parts:

$$\int_{PR} \left(D\frac{dy}{dx} - C \right) dy = \int_{PR} \frac{D - C\frac{dy}{dx}}{\frac{dy}{dx}} dy =$$

$$= \int_{PR} \frac{D + C\mathrm{ctg}\theta}{-\mathrm{ctg}\theta} dy = \int_{PR} \frac{\psi}{-\mathrm{ctg}\theta} dy =$$

$$= -\frac{y\psi}{\mathrm{ctg}\theta}\Bigg|_{y=y_P}^{y=y_R} + \int_{PR} y\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{\psi}{\mathrm{ctg}\theta} \right) d\xi,$$

$$\int_{RS} \left(D\frac{dx}{dy} - C \right) dy = \int_{RS} \frac{D - C\mathrm{tg}\theta}{\mathrm{tg}\theta} dy =$$

$$= \int_{RS} \frac{\varphi}{\mathrm{tg}\theta} dy = \frac{y\varphi}{\mathrm{tg}\theta}\Bigg|_{x=x_R}^{x=x_S} - \int_{RS} y\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{\varphi}{\mathrm{tg}\theta} \right) d\eta.$$

Assuming $\varphi = \mathrm{tg}\theta$, $\psi = 0$ one can get the boundary conditions for the system (65) in the form:

$$\varphi\big|_{RS} = \mathrm{tg}\frac{\eta - \xi_0}{2}', \quad \psi\big|_{PR} = 0'. \qquad (124)$$

Under such assumption the final expression for the coordinate y_R looks like:

$$\int_{SPR} Ddx - Cdy =$$

$$= \int_{SP} \left(Ddx - Cdy \right) + \frac{x\psi}{\mathrm{ctg}\theta}\Bigg|_{y=y_P}^{y=y_R} + \frac{y\varphi}{\mathrm{tg}\theta}\Bigg|_{y=y_R}^{y=y_S} = 0, \qquad (125)$$

$$y_R = \int_{SP} \left(Ddx - Cdy \right) + y_S'.$$

It remains to resolve the problems (65), (122) and (65), (124). These problems can be redused to the equation (66). Namely, taking into account that fuctions φ, ψ are related with function ρ in the following way

$$\varphi = \frac{\rho}{\cos\theta}', \quad \psi = \frac{2}{\sin\theta}\frac{\partial\rho}{\partial\xi}', \qquad (126)$$

one can obtain the problems

$$\frac{\partial^2\rho}{\partial\xi\partial\eta} - \frac{\rho}{4} = 0', \ \rho\big|_{\xi=\xi_0} = \cos\frac{\eta - \xi_0}{2}', \ \frac{\partial\rho}{\partial\xi}\Bigg|_{\eta=\eta_0} = 0 \qquad (127)$$

and

$$\frac{\partial^2\rho}{\partial\xi\partial\eta} - \frac{\rho}{4} = 0', \ \rho\big|_{\xi=\xi_0} = \sin\frac{\eta - \xi_0}{2}', \ \frac{\partial\rho}{\partial\xi}\Bigg|_{\eta=\eta_0} = 0. \qquad (128)$$

A general solution of the first problem (128) (for the coordinate x_R) is the following function:

$$\rho = \rho_1(\xi, \eta) = I_0\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)} \right) \cos\frac{\eta_0 - \xi_0}{2} -$$

$$-\frac{1}{2}\int_{\eta_0}^{\eta} I_0\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \tau)} \right) \sin\frac{\tau - \xi_0}{2} d\tau,$$

moreover

$$\frac{\partial\rho_1}{\partial\xi} = \frac{1}{2}\cos\frac{\eta_0 - \xi_0}{2} I_1\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)} \right) \sqrt{\frac{\eta - \eta_0}{\xi - \xi_0}} -$$

$$-\frac{1}{4}\int_{\eta_0}^{\eta} I_1\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \tau)} \right) \sqrt{\frac{\eta - \tau_0}{\xi - \xi_0}} \sin\frac{\tau - \xi_0}{2} d\tau.$$

The solution of the second problem (128) (for the coordinate y_R) is the function:

$$\rho = \rho_2(\xi, \eta) = I_0\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \eta_0)} \right) \sin\frac{\eta_0 - \xi_0}{2} +$$

$$+\frac{1}{2}\int_{\eta_0}^{\eta} I_0\left(\sqrt{(\xi - \xi_0)(\eta - \tau)} \right) \cos\frac{\tau - \xi_0}{2} d\tau,$$

when

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \xi} = \frac{1}{2}\sin\frac{\eta_0 - \xi_0}{2} I_1\left(\sqrt{(\xi-\xi_0)(\eta-\eta_0)}\right)\sqrt{\frac{\eta-\eta_0}{\xi-\xi_0}} +$$

$$-\frac{1}{4}\int_{\eta_0}^{\eta} I_1\left(\sqrt{(\xi-\xi_0)(\eta-\tau)}\right)\sqrt{\frac{\eta-\tau_0}{\xi-\xi_0}}\cos\frac{\tau-\xi_0}{2}d\tau.$$

In all solutions the function I_0 is the Bessel function of the first kind of an imaginary argument $I_0(0)=1$, $I_0^{'}(0)=0$.

The functions φ, ψ can be found using formulas (126). From the relation (66) one can obtain the components of conservation laws:

$$D = \frac{\psi \mathrm{tg}\theta + \varphi \mathrm{ctg}\theta}{\mathrm{tg}\theta + \mathrm{ctg}\theta} = \psi \sin^2\theta + \varphi\cos^2\theta,$$

$$C = \frac{\psi - \varphi}{t\mathrm{g}\theta + \mathrm{ctg}\theta} = (\psi - \varphi)\sin\theta\cos\theta.$$

Substituting the obtained *C* and *D* in (123) and (124) one can get the coordinates of the point *R*. Thus Cauchy problem for the system of plasticity (56), (57) with starting data (121) is resolved completely.

Conclusion. The small range of problems considered in this article, concerning the construction of elasto-plastic boundaries reveals good prospects of the application of conservation laws for the the boundary problems solving. By now, the authors have solved some other problems of solid mechanics and prepare them to publish.

More results in the study of equations of elasticity and plasticity can be found in articles [14–17].

Acknowledgements. Research is supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation, the project Б-180-14 and the FSP “Researches and Elaboration on the Priority Directions of Development of a Scientific and Technological Complex of Russia for 2014–2020”, the project No. 14.574.21.0082.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ проект № Б 180-14 и ФЦП FSP «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научного и технологического комплекса России на 2014–2020», проект № 14.574.21.0082.

References

1. Annin B. D., Cherepanov G. P. *Uprugoplasticheskaya zadacha* [The Elasto-plastic Problem]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 238 p.

2. Galin L. A. [The plane elasto-plastic problem], *PMM*. 1946, Vol. 10, No. 3, P. 367–386 (In Russ.).

3. Galin L. A. *Uprugoplasticheskie zadachi* [Elasto-plastic problems]. Moscow, Nauka Publ.,1984, 232 p.

4. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yahno A. N. *Prilozhenie simmetriy I zakonov sokhraneniya k resheniyu differentsialnyikh uravneniy* [Application of symmetries and conservation laws to solving of differential equations]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 2001, 190 p.

5. Senashov S. I., Gomonova O. V., Yahno A. N. *Matematicheskie voprosyi dvumernyikh uravneniy idealnoy plastichnosti* [Mathematical problems of the two-dimensional equations of ideal plasticity]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2012, 137 p.

6. Senashov S. I., Yakhno A. N. Some Symmetry Group Aspects of a Perfect Plane Plasticity System. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2013, No. 46, P. 355202.

7. Senashov S. I. Cherepanova O. N., Kondrin A. V. [Elastoplastic bending of beam] *J. Siberian Federal Univ., Math. & Physics.*, 2014, No. 7(2), P. 203–208.

8. Senashov S. I. Cherepanova O. N., Kondrin A. V. [An elasto-plastic torsion of rod]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 3(49), P. 100–103 (In Russ.).

9. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V., Filyushina E. V. *Raschet napryazhennogo sostoyaniya vo vnutrennikh tochkakh uprugoplasticheskogo sterzhnya postoyannogo secheniya* [The Calculation of the Stress State in the Interior points of Elasto-plastic Rod of Constant Cross-section]. Certificate of state registration of the computer number 2013618484, 2013, P. 1.

10. Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V., Yahno A. N., Filyushina E. V. *Postroenie uprugoplasticheskoy granitsi, voznikayuschiy pri kruchenii pryamolineynogo sterzhnya s secheniem pryamougolnoy formy* [Construction of the Elastoplastic Boundary Arising under the Torsion of a Straight Rod with a Rectangular Cross-section]. Certificate of state registration of the computer number 20146616472, 2014, P. 1.

11. Arutyunyan N. H., Abramyan B. L. *Kruchenie uprugikh tel* [Torsion of Elastic Bodies]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963, 688 p.

12. Senashov S. I., Filyushina E. V. [Conservation Laws of the Plane Theory of Elasticity]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 1(53), P. 79–81 (In Russ.).

13. Senashov S. I., Kondrin A. V. [Development of an information system for determination of elastic-plastic boundary of rods of rolled profiles]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 4(56), P. 119–125 (In Russ.).

14. Senashov S. I., Yakhno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. *SIGMA.* Special Issue “Geometrical Methods in Mathematical Physics”. 2012, Vol. 8, 16 p. Available at: http://dx.doi.org/10.3842/SIGMA.2012.071.

15. Senashov S. I., Yakhno A. N. Group analysis of Slutions of 2-dimensional Differential Equations. Lie Groups: New Research. *Nova science publishers*, New York, 2009, P. 123–138.

16. Senashov S. I., Yakhno A. N. Deformation of Characteristic Curves of the Plane Ideal Plasticity Equations by Point Symmetries. *Nonlinear analysis.* 2009, No. 71. P. 1274–1284.

17. Senashov S. I. [Conservation Laws in the Problem of the Longitudinal Plane Wave Loaded in the Elasto-plastic Rod]. *Vestnik SibGAU*, 2011, No. 3(36), P. 82–85 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Аннин Б. Д., Черепанов Г. П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск : Наука, 1983. 238 с.

2. Галин Л. А. Плоская упруго-пластическая задача // ПММ. 1946. Т. 10, вып. 3. С. 367–386.

3. Галин Л. А. Упруго-пластические задачи. М. : Наука, 1984. 232 с.

4. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2001. 190 с.

5. Сенашов С. И., Гомонова О. В., Яхно А. Н. Математические вопросы двумерных уравнений идеальной пластичности / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2012. 137 с.

6. Senashov S. I., Yakhno A. N. Some symmetry group aspects of a perfect plane plasticity system // J. Phys. A: Math. Theor. 2013. № 46. P. 355202.

7. Сенашов С. И. Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Elastoplastic Bending of Beam // Math. & Physics : J. Siberian Federal Univ. 2014. № 7(2). P. 203–208.

8. Сенашов С. И. Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Об упруго-пластическом кручении стержня // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 3(49). С. 100–103.

9. Расчет напряженного состояния во внутренних точках упруго-пластического стержня постоянного сечения : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / С. И. Сенашов, О. Н. Черепанова, А. В. Кондрин, Е. В. Филюшина. № 2013618484. 2013. С. 1.

10. Построение упруго-пластической границы, возникающей при кручении прямолинейного стержня с сечением прямоугольной формы : Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / С. И. Сенашов, О. Н. Черепанова, А. В. Кондрин, А. Н. Яхно, Е. В. Филюшина. № 20146616472. 2014. С. 1

11. Арутюнян Н. Х., Абрамян Б. Л. Кручение упругих тел. М. : Физматгиз, 1963. 688 с.

12. Сенашов С. И., Филюшина Е. В. Законы сохранения плоской теории упругости // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 79–81.

13. Сенашов С. И., Кондрин А. В. Разработка информационной системы для нахождения упруго-пластической границы стержней прокатного профиля // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 119–125.

14. Senashov S. I., Yakhno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity // SIGMA. Special Issue “Geometrical Methods in Mathematical Physics”. 2012. Vol. 8. 16 p. URL: http://dx.doi.org/10.3842/SIGMA.2012. 071.

15. Senashov S. I., Yakhno A. N. Group analysis of solutions of 2-dimensional differential equations. Lie Groups: New research. New York : Nova science publishers, 2009. P. 123–138.

16. Senashov S. I., Yakhno A. N. Deformation of characteristic curves of the plane ideal plasticity equations by point symmetries // Nonlinear analysis. 2009. № 71. Pp. 1274–1284.

17. Сенашов С. И. Законы сохранения в задаче о продольной плоской волне нагрузки в упруго-пластическом стержне // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 3(36). С. 82–85.

© Senashov S. I., Filyushina E. V., Gomonova O. V., 2015

УДК 519.677

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 360–363

О МОДИФИКАЦИИ БЫСТРОГО ОДНОМЕРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ПО АЛГОРИТМУ КУЛИ–ТЬЮКИ

Т. В. Сидорова[1], Т. В. Зыкова[1*], К. В. Сафонов[2]

[1] Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: zykovatv@mail.ru

Рассматривается один из методов нахождения дискретного преобразования Фурье, позволяющий уменьшить затраты машинного времени на вычисления по сравнению с классическим алгоритмом. Быстрые алгоритмы вычисления преобразования Фурье очень востребованы и актуальны, они имеют множество приложений в задачах цифровой обработки одномерных и многомерных сигналов, обработки различных изображений, например космоснимков. Общепринятый алгоритм представляет собой последовательное вычисление одномерного дискретного преобразования Фурье по строкам и столбцам. Существуют различные методы ускорения данного алгоритма, один из которых и реализован в данной статье. Представлена программная реализация модифицированного алгоритма по аналогу Кули–Тьюки дискретного преобразования Фурье для одномерного сигнала с числом отсчетов $p \cdot 2^s$, $p, s \in N$. *Для данного алгоритма была разработана программа в системе компьютерной математики MATLAB. Она протестирована на наборе, состоящем из 16384 отсчетов одномерного сигнала. При выполнении программы производится также сравнение времени ее выполнения со временем, затрачиваемым встроенным алгоритмом вычисления быстрого преобразования Фурье. В результате, среднее время выполнения программы по модифицированному алгоритму дает выигрыш около 20 % по времени. Кроме того, приводится общее описание алгоритма дискретного преобразования Фурье, обозначены возможности для увеличения скорости выполнения вычислений, рассматривается модифицированный алгоритм по аналогу Кули–Тьюки быстрого преобразования Фурье для одномерных и многомерных сигналов.*

Ключевые слова: преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье (БПФ), алгоритм БПФ Кули–Тьюки, MATLAB, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС).

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 360–363

ABOUT MODIFICATION OF ONE-DIMENSIONAL FAST FOURIER TRANSFORM ON ALGORITHM OF COOLEY-TUKEY

T. V. Sidorova[1], T. V. Zykova[1*], K. V. Safonov[2]

[1]Siberian Federal University, Institute of Space and Informatics Technologies
26, Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660079, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: zykovatv@mail.ru

In the present paper we give the description a method of finding the discrete Fourier Transform, which allows to reduce the cost of computer time to calculate compared to the classical algorithm. Fast algorithms for calculating the Fourier transform are very relevant and actual, they have many applications in problems of digital processing of one-dimensional and multi-dimensional signal and processing of different images, for example, satellite images. A common algorithm is a sequential calculation of the one-dimensional Discrete Fourier Transform by rows and columns. There are various methods of acceleration of the algorithm, one of which is implemented in this article.

It is presented the software implementation of the modified algorithm of Cooley–Tukey analog for the Discrete Fourier Transform for the one-dimensional signal with the number of counts $p \cdot 2^s$, $p, s \in N$. *For this algorithm, we developed a program in the computer algebra system MATLAB. It has been tested on a set consisting of a 16384 counts of one-dimensional signal. The time of calculations for the classical algorithm and for modified algorithm of Fast Fourier Transform is carried out. As a result, the average computer time for the modified algorithm gives about 20 % time reduction. In addition, in the article it is provided a general description of the Discrete Fourier Transform algorithm*

and indicated opportunities for increasing of the speed of computing. Also, it is considered a modified algorithm of Cooley–Tukey analog for the Fast Fourier Transform of one-dimensional and multidimensional signals.

Keywords: Fourier Transform, Fast Fourier Transform (FFT), Cooley–Tukey FFT algorithm, MATLAB, programmable logic device (PLD).

Введение. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ), одномерное и многомерное, имеет множество приложений в задачах цифровой обработки сигналов, например, ДПФ можно использовать для спектрального анализа многомерных сигналов, для обработки космоснимков. Общепринятый алгоритм, который лежит во всех стандартных пакетах обработки сигналов, представляет собой последовательное вычисление одномерного дискретного преобразования Фурье, так называемый алгоритм «по строкам, по столбцам». Существуют различные методы ускорения данного алгоритма – быстрое преобразование Фурье. Самой распространенной реализацией быстрого преобразования Фурье является алгоритм Кули–Тьюки. Модификации данного алгоритма позволяют сократить время выполнения вычислений быстрого преобразования Фурье. Увеличение скорости выполнения алгоритма можно получить путем изменения основания алгоритма Кули–Тьюки: вместо основания 2 берут 4, 8, 16 и т. д., а также использованием параллельных вычислений.

В работе создана программа в среде MATLAB модифицированного алгоритма Кули–Тьюки для сигнала с числом отсчетов $p \cdot 2^s$, $p, s \in N$. Число операций в этом алгоритме меньше, чем при непосредственном вычислении дискретного преобразования Фурье, что позволило сократить время выполнения программы по сравнению со встроенным алгоритмом [1–3].

Быстрое преобразование Фурье на основе модифицированного алгоритма Кули–Тьюки. Дискретное преобразование Фурье периодического дискретного сигнала $x(n)$ с периодом N определяется как

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\frac{2\pi i}{N} nk}, \; k = 0, 1, \ldots, N-1. \qquad (1)$$

Функция $X(k)$ является периодической функцией по аргументу k с периодом N. Дискретное преобразование Фурье представляет собой N отсчетов спектра, взятых на периоде с интервалом дискретизации по частоте, равным $\frac{2\pi}{NT}$. Для больших значений N прямое вычисление по выражению (1) требует выполнения весьма большого числа арифметических операций умножения и сложения, что затрудняет реализацию вычислений в реальном масштабе времени.

Быстрым преобразованием Фурье называют набор алгоритмов, реализация которых приводит к существенному уменьшению вычислительной сложности дискретного преобразования Фурье [4]. Основная идея быстрого преобразования Фурье состоит в том, чтобы разбить исходный N-отсчетный сигнал $x(n)$ на два более коротких сигнала, ДПФ которых могут быть скомбинированы таким образом, чтобы получить ДПФ исходного N-отсчетного сигнала. Так, если исходный N-отсчетный сигнал разбить на два $\frac{N}{2}$-отсчетных сигнала, то для вычисления ДПФ каждого из них потребуется около $\left(\frac{N}{2}\right)^2$ комплексных умножений. Тогда для вычисления искомого N-отсчетного ДПФ потребуется порядка $2\left(\frac{N}{2}\right)^2 = \frac{N^2}{2}$ комплексных умножений, т. е. вдвое меньше по сравнению с прямым вычислением. Операцию разбиения можно повторить, вычисляя вместо $\left(\frac{N}{2}\right)$-отсчетного ДПФ два $\left(\frac{N}{4}\right)$-отсчетных ДПФ и сокращая тем самым объем вычислений еще в два раза. Существует большое количество алгоритмов БПФ, однако все они являются частными случаями единого алгоритма, базирующегося на задаче разбиения одного массива чисел на два. Наиболее распространенным алгоритмом является алгоритм Кули–Тьюки [5] и его аналоги [6–9].

Алгоритм Кули–Тьюки по основанию 2 работает следующим образом. В этом случае количество отсчетов в выборке функции должно быть кратно степени 2. Выборка делится пополам, далее каждая половина делится на две части. Продолжается данный процесс до тех пор, пока не останутся два элемента, для которых реализуется преобразование Фурье. Таким образом, при вычислении одномерного дискретного преобразования Фурье длиной N необходимо выполнить $\frac{N}{2} \cdot \log_2 N$ двухточечных ДПФ, каждое из которых требует одно комплексное умножение и два комплексных сложения.

Двумерное разбиение по основанию 2 делит выборку $N \times N$ элементов на четыре выборки $\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$ элементов и т. д. до тех пор, пока не останутся выборки 2×2 элементов (см. рисунок).

Алгоритм двумерного ДПФ с разбиением на строки и столбцы требует проведения $2N$-одномерных ДПФ, и вычислительная сложность его составляет $N^2 \log_2 N$ комплексных умножений и $2 \cdot N^2 \log_2 N$ комплексных сложений.

Разработка различных модификаций алгоритма Кули–Тьюки в одномерном и многомерном случаях проводилась М. В. Носковым, А. В. Старовойтовым и другими исследователями в работах [10–13]. Все результаты работ направлены на уменьшение времени вычислений. Этого можно добиться путем уменьшения числа операций комплексного умножения и сложения, изменения основания алгоритма Кули–Тьюки

или распараллеливая вычисления. Кроме того, само комплексное умножение можно вычислять различным образом – через 4 действительных умножения и 2 сложения или за 3 действительных умножения и 3 действительных сложения.

Рассмотрим сигнал f, который является периодическим сигналом с периодом $p \cdot 2^s$ (см., например, [14]). Отсчеты задаются как f_k где $k = 0, 1, \ldots, p \cdot 2^s - 1$. Дискретное преобразование Фурье для данного сигнала f задается формулой

$$F(t) = \sum_{k=0}^{p \cdot 2^s - 1} f_k e^{\frac{2\pi i}{p \cdot 2^s} kt}.$$

Разобьем данную сумму на 2^s сумм следующего вида

$$F(t) = \sum_{k_1=0}^{2^s-1} \sum_{k_2=0}^{p-1} f_{pk_1+k_2} e^{\frac{2\pi i}{p \cdot 2^s} t(pk_1+k_2)} =$$

$$= \sum_{k_1=0}^{2^s-1} \left(\sum_{k_2=0}^{p-1} f_{pk_1+k_2} e^{\frac{2\pi i}{p \cdot 2^s} tk_2} \right) e^{\frac{2\pi i}{2^s} tk_1}.$$

Внешнюю сумму можно рассматривать как преобразование Фурье для сигнала с числом отсчетов 2^s, для подсчета которого можно воспользоваться алгоритмом Кули–Тьюки, а внутреннюю сумму вычислить как ДПФ для сигнала с числом отсчетов p. Тогда общее число операций в полученном алгоритме составит $p \cdot 2^s \cdot s$ комплексных сложений и $p \cdot 2^s \cdot \frac{s}{2}$ комплексных умножений.

Модифицированный одномерный алгоритм БПФ по аналогу Кули–Тьюки в MATLAB. Описанный алгоритм был реализован в виде программы в системе компьютерной математики MATLAB и протестирован на наборе, состоящем из 16384 отсчетов сигнала. Время выполнения программы сравнивалось со временем, потраченным на вычисление ДПФ с помощью встроенного алгоритма среды MATLAB. В таблице приведены данные выполнения модифицированного алгоритма и встроенной версии, программа тестировалась на виртуальной машине со следующими параметрами: AMD Phenom X2 3.2GHz, 2 Gb ОЗУ. Время выполнения сократилось в среднем на 20 %. Разработанная программа была зарегистрирована [15].

Заключение. Представлена реализация модифицированного алгоритма по аналогу Кули–Тьюки дискретного преобразования Фурье для одномерного сигнала с числом отсчетов $p \cdot 2^s$. Для данного алгоритма была разработана программа в системе компьютерной математики MATLAB. Авторы ставили перед собой задачу реализации модифицированного одномерного алгоритма БПФ по аналогу Кули–Тьюки именно в MATLAB, так как для реализации цифровой обработки сигналов радиоприемных устройств на практике часто используют программное обеспечение фирмы Xilinx (LogiCORE IP Fast Fourier Transform), где БПФ реализовано по алгоритму Кули–Тьюки в MATLAB.

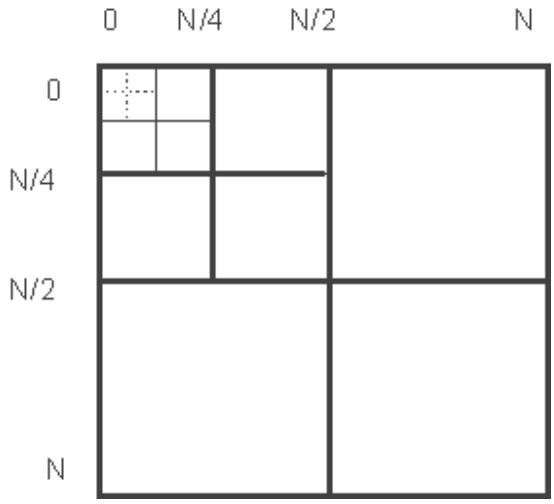


Схема прореживания двумерного ДПФ по основанию 2

Время выполнения модифицированного алгоритма и встроенного алгоритма Кули–Тьюки в MATLAB

Модифицированный алгоритм	Встроенный алгоритм
2,063	2,634
2,004	2,523
2,025	2,484
2,013	2,582
2,053	2,404
1,996	2,353
2,014	2,634

Дальнейшую перспективу работы авторы статьи видят в проведении сравнительного анализа разработанного алгоритма в среде MATLAB с другими алгоритмами, описанными в недавних работах современных исследователей.

Благодарности. Второй автор поддержан грантом Министерства образования и науки Российской Федерации № 1.1462.2014/K.

Acknowledgments. The second author was supported by grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation № 1.1462.2014/K.

Библиографические ссылки

1. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М. : Мир, 1988. 488 с.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М. : Мир, 1989. 448 с.
3. Оппенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов. М. : Связь, 1979. 416 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Cooley J. W., Tukey J. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Math. Comput. 1965. Vol. 19, No. 90. P. 297–301.
6. Rudnick P. Note on the calculation of fourier series // Math. Comp. 1966. Vol. 20, No. 3. P. 429–430.
7. Danielson G. C., Lanczos C. Some improvements in practical fourier analysis and their application to *x*-ray scattering from liquids // J. Franklin Inst. 1942. Vol. 233, No. 4. P. 365–380.
8. Heideman M. T., Johnson D. H., Burrus C. S. Gauss and the history of the fast fourier transform // The ASSP Magazine. 1984. Vol. 1, No. 4. P. 14–21.
9. Cooley J. W., Lewis P. A., Welch P. D. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series // IEEE Trans. Audio Electroacoustics. 1967. Vol. 15, No. 2. P. 76–79.
10. Старовойтов А. В. О многомерном аналоге алгоритма Кули–Тьюки // Вестник СибГАУ. 2010. Т. 27, № 1. С. 69–73.
11. Киселев О. И., Кольцова И. В., Тутатчиков В. С. Схема параллельного вычисления одномерного быстрого преобразования Фурье // Наука и образование в XXI веке : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (30 сент. 2013, г. Тамбов) : в 8 ч. / Институт повышения квалификации. Тамбов, 2013. С. 140–141.
12. Tutatchikov V. S., Kiselev O. I., Noskov M. V. Calculating the *n*-Dimensional Fast Fourier Transform // Pattern Recognition and Image Analysis. 2013. Vol. 23, No. 3. P. 429–433.
13. Noskov M. V., Tutatchikov V. S. Modification of a two-dimensional fast fourier transform algorithm for a rectangle signal // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25, No. 1. P. 81–83.
14. Малоземов В. П., Машарский С. М. Основы дискретного гармонического анализа. СПб. : НИИММ, 2003. 304 с.
15. Программа для вычисления одномерного быстрого преобразования Фурье на основе модифицированного алгоритма Кули–Тьюки : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / Т. В. Сидорова, Т. В. Зыкова ; Роспатент. № 2014661701 РФ ; заявл. 19.09.2014 (заявка № 2014619428) ; зарег. 11.11.2014.

References

1. Dadzhion D., Mersero R. *Tsifrovaya obrabotka mnogomernykh signalov* [Digital processing of multidimensional signals]. Moscow, Mir Publ., 1988, 488 p.
2. Bleynut R. *Bystrye algoritmy tsifrovoi obrabotki signalov* [Fast algorithms of digital processing of signals]. Moscow, Mir Publ., 1989, 448 p.
3. Oppengeym A. V., Shafer R. V. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital processing of signals]. Moscow, Svyaz Publ., 1979, 416 p.
4. Gonsalez R., Woods R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii* [Digital processing of images]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 1072 p.
5. Cooley J. W., Tukey J. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* 1965, Vol. 19, No. 90, P. 297–301.
6. Rudnick P. Note on the calculation of fourier series. *Math. Comp.* 1966, Vol. 20, No. 3, P. 429–430.
7. Danielson G. C., Lanczos C. Some improvements in practical fourier analysis and their application to x-ray scattering from liquids. *J. Franklin Inst.* 1942, Vol. 233, No. 4, P. 365–80.
8. Heideman M. T., Johnson D. H., Burrus C. S. Gauss and the history of the fast fourier transform. *The ASSP Magazine.* 1984, Vol. 1, No. 4, P. 14–21.
9. Cooley J. W., Lewis P. A., Welch P. D. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *IEEE Trans. Audio Electroacoustics.* 1967, Vol. 15, No. 2, P. 76–79.
10. Starovoitov A. V. [About multidimensional analog of algorithm of Cooley–Tukey]. *Vestnik SibGAU.* 2010, No. 1 (27), P. 69–73 (In Russ.).
11. Kiselev O. I., Kolthova I. V., Tutatchikov V. S. [Scheme of parallel calculation of one-dimensional fast fourier transformation]. *Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. “Nauka i obrazovanie v XXI veke”* [Materials Intern. Scientific. Conf “Science and education in the XXI century”]. Tambov, 2013, P. 140–141 (In Russ.).
12. Tutatchikov V. S., Kiselev O. I., Noskov M. V. Calculating the n-Dimensional Fast Fourier Transform. *Pattern Recognition and Image Analysis.* 2013, Vol. 23, No. 3, P. 429–433.
13. Noskov M. V., Tutatchikov V. S. Modification of a two-dimensional fast fourier transform algorithm for a rectangle signal. *Pattern Recognition and Image Analysis.* 2015, Vol. 25, No. 1, P. 81–83.
14. Malozemov V. P., Masharsky S. M. *Osnovy diskretnogo garmonicheskogo analiza* [Bases of the discrete harmonious analysis]. St. Peterburg, NIIMM Publ., 2003, 304 p.
15. Sidorova T. V., Zykova T. V. *Programma dlya vychisleniya odnomernogo bystrogo preobrazovaniya Fur'e na osnove modifitsirovannogo algoritma Kuli-T'yuki* [The program for calculation of one-dimensional fast Fourier transformation on the basis of the modified algorithm of Cooley-Tukey]. Certificate on the state registration of the computer program No. 2014661701 of the Russian Federation, dem. 19.09.2014 (demand No. 2014619428), registration 11.11.2014 Rospatent.

© Сидорова Т. В. Зыкова Т. В.,
Сафонов К. В., 2015

УДК 621.396.946.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 364–367

ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОСВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ И МАГНИТНЫХ АНТЕНН ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Н. А. Тестоедов[1], В. В. Двирный[1], Г. Г. Крушенко[2*], Г. В. Двирный[1]

[1] АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[2] Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

Применение космоса для традиционных радиолюбительских приложений возможно с помощью относительно дешевых маложивущих микроспутников, которые выводятся на низкие орбиты экипажем космической станции. Радиосвязь может быть построена на базе отражателей и частотно-независимых малых магнитных антенн с вращающейся поляризацией, которые должны выполнять специальную функцию – связывать излученную в пространстве электромагнитную энергию с электронными компонентами аппаратуры, и поэтому они являются одними из основных элементов, определяющих построение радиотехнических систем. Поскольку в природе нет магнитных зарядов и, следовательно, нет магнитного тока, понимаемого как движение этих зарядов, то магнитный излучатель как элемент магнитного тока не может быть осуществлен, однако если антенный излучатель изначально создает переменное вращающееся вихревое магнитное поле, создать антенну возможно, реализовав в ней свойства магнитоэлектрической индукции. Первая телефонная спутниковая связь между Америкой и Великобританией была налажена через массивный экспериментальный американский спутник Echo1, запущенный на низкую околоземную орбиту, который представлял собой шар диаметром около 30 м, изготовленный из радиоотражающего материала. Тип такого спутника связи можно применить и в предлагаемой радиосвязи. Однако поскольку приемные и передающие антенны являются узконаправленными, то космический аппарат должен иметь на орбите такую ориентацию, чтобы он принял сигнал и отразил его. Диаметр сферы при этом может быть значительно меньших размеров, а положение на орбите можно удерживать корректирующей двигательной установкой, расположенной в центре масс. Радиоотражающая поверхность может быть выполнена из надувной пленки или сетеполотна, изготовленного, например, из позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром порядка 30 мкм, разворачиваемого в сферу в трансформируемой конструкции. Возможен вариант выполнения сетеполотна из магнитно-мягкого материала типа сталей Э8, Э10, железа «Армко» или пермаллоя, которые являются идеальными проводниками магнитных потоков и не требуют охлаждения до криогенных температур.

Ключевые слова: радиосвязь, микроспутники, магнитные антенны.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 364–367

THE POSSIBILITY OF CONSTRUCTING A RADIO COMMUNICATION USING ORBITAL REFLECTORS AND MAGNETIC ANTENNAS POLARIZATION ROTATING

N. A. Testoedov[1], V. V. Dvirnyi[1], G. G. Krushenko[2*], G. V. Dvirnyi[1]

[1]JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[2] Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

The use of space for traditional Amateur radio applications is possible using relatively cheap only briefly long microsatellites, which are displayed on a low orbit of the space station crew. The radio can be built on the basis of reflectors and frequency-independent small magnetic antenna with circular polarization, which must fulfill a special function: to associate radiated into space electromagnetic energy with electronic components of the apparatus, and therefore are one of the main defining elements of the building radio systems. Since there are no magnetic charges, and therefore, no magnetic current, understood as the movement of these charges, a magnetic emitter, a magnetic current

element, cannot be accomplished, however, if the antenna radiator initially creates an alternating rotating vortex magnetic field, it is possible to create the antenna having in it the properties of magneto-electric induction. The first satellite phone communication between America and Britain was established through a massive experimental American satellite Echo1, launched into low earth orbit, which represented a ball with a diameter of about 30 m, made of radiotracer material. The type of such a communication satellite can be used in the proposed radio communications. However, since the receiving and transmitting antennas are highly directional, the spacecraft must be in the orbit of such an orientation that it took the signal and reflected it. The diameter of the sphere can be much smaller, and the position in orbit to keep a corrective propulsion system, located in the center of mass. Radioreflective surface may be made of an inflatable film or setpolicy made, for example, of gold-plated tungsten wire with a diameter of about 30 μm deployed in the field in transformable structures. Possible embodiment of setpolicy of magnetically soft material type steel A, E, iron "Armco" or permalloy, which are perfect conductors of magnetic flux and do not require cooling to cryogenic temperatures.

Keywords: radio, microsatellites, magnetic antennas.

Введение. Современное радиолюбительство – это развивающееся направление телекоммуникаций, включающее радиотехнические системы с передающими устройствами, генерирующие радиочастотные сигналы, фидерные системы, доставляющие эти сигналы до антенны, которые преобразуют сигналы в электромагнитные излучения, распространяющиеся в пространстве и достигающие приемных антенн, где преобразуются в электрические токи и через фидерные системы поступают на входы усилителей приемников.

Применение космоса для традиционных радиолюбительских приложений возможно с помощью относительно дешевых маложивущих микроспутников (ММС), которые выводятся «пассажирами» на низкие орбиты, например, экипажем космической станции. Радиосвязь может быть построена на базе отражателей и частотно-независимых малых магнитных антенн (ММА) с вращающейся поляризацией [1].

ММА должны выполнять специальную функцию – связывать излученную в пространстве электромагнитную энергию с электронными компонентами аппаратуры, и поэтому они являются одними из основных элементов, определяющих построение радиотехнических систем.

Поскольку в природе нет магнитных зарядов и, следовательно, нет магнитного тока, понимаемого как движение этих зарядов, то магнитный излучатель как элемент магнитного тока не может быть осуществлен, однако если антенный излучатель изначально создает переменное вращающееся вихревое магнитное поле, создать антенну возможно, реализовав в ней свойства магнитоэлектрической индукции. ММА в зоне излучения создает вращающееся вихревое магнитоэлектрическое поле, которое по структуре эквивалентно электромагнитному полю, излученному электрической антенной.

Поскольку изменение магнитного поля во времени сопровождается появлением в пространстве электрического поля, то это закон магнитоэлектрической индукции, существование которого приводит к возможности существования симметричного явления – электромагнитной индукции, порождающей вихревое электрическое поле.

Магнитное же поле всегда вихревое, независимо от того, обусловлено оно постоянным током или переменным электрическим полем, поскольку линии магнитного поля всегда замкнуты и в них нет истоков и стоков (начала и конца).

Антенные системы. Антенная система, создающая переменное электрическое или магнитное поле, может излучать электромагнитные или магнитоэлектрические волны соответственно, но получение качественного сигнала возможно только при выполнении определенных условий, связанных с используемым частотным диапазоном, в то время как магнитное поле магнитной антенны сосредоточено в основном в обмотке и излучение не связано с выполнением условий, определяемых используемым частотным диапазоном, и, следовательно, в них отсутствуют потери энергии в процессе излучения свободных магнитоэлектрических полей, которые распространяются в свободном пространстве со скоростью света в виде бегущих магнитоэлектрических волн.

Исторически сложилось так, что для приема и передачи радиосигналов используются электрические антенны, а для усиления – электронные схемы на базе колебательного контура, когда входящая радиоволна сначала взаимодействует с антенной, а потом с усилителем вносят помехи в сигнал с потерей слабых сигналов и искажением более сильных.

Для современного радиотелескопа, например по проекту «Миллиметрон» [2], для приема сверхслабых сигналов с целью уменьшения тепловых колебаний и, соответственно, электрического шума требуется мощное охлаждение – вплоть до 4 К. Благодаря вышеописанным свойствам ММА, не требующие работы при криогенных температурах, могут найти применение в радиотелескопах, особенно космических, где громоздкое дорогостоящее криогенное охлаждение окажется невыгодным, а ММА впервые смогут принять радиосигналы, посылаемые из далекого космоса, поскольку получение сверхнизких температур имеет предел – абсолютный ноль (минус 273,15 ºС).

В 1965 г. астрономы Пензиас и Вильсон [3], используя построенную для связи со спутниками рупорную антенну лаборатории фирмы Белл-Телефон, сконструированную так, чтобы обеспечить сверхнизкий уровень собственных шумов, обнаружили [4] в микроволновом диапазоне на длине волны 7,35 см при температуре 3,5 ± 1,0 К слабый дополнительный радиошум, интенсивность которого не зависела ни от направления антенны, ни от времени суток,

который получил название «реликтовое излучение» – «след» от Большого взрыва.

При использовании метода адиабатического размагничивания удалось достичь температуры примерно 0,003 К, а методом ядерного адиабатического размагничивания достигнута температура 2×10^{-8} К, при которой практически не действуют никакие известные физические законы [5].

Границы полос любительских радиочастот, в том числе и для связи через спутники Земли, известны и размещены, например, на сайте радиолюбителей Омской области [6].

Энергетический расчет спутниковой линии связи проводится для двух участков: Земля–спутник и спутник–Земля [7], с учетом свойств излучения вихревых магнитоэлектрических полей в пространстве, что предполагает существенный выигрыш по энергетике, который возможно классифицировать при испытаниях радиосвязи с применением ММА. При этом необходимо учитывать ограничения по скорости света и улучшение характеристик при увеличении частоты вращения переменного магнитного поля, а при охлаждении обмоток до криогенных температур возможно многократное увеличение мощности радиосигналов.

Создание переменного магнитного поля в магнитной антенне аналогично созданию вращающегося магнитного поля в электродвигателях, имеющих многофазные кольцевые обмотки, например, в асинхронных и вентильных [8]. Последние применяются на космических аппаратах (КА). Вектор вращающегося магнитного поля *B* создается, например, при питании трехфазной кольцевой обмотки трехфазным синусоидальным током. Предполагается конструкция ММА, где кольцевая фазовая обмотка магнитной антенны например трехфазная, может быть расположена на поверхности кольца из ферромагнетика так, что оси трех катушек сдвинуты на угол 120° относительно друг друга в пространстве и запитаны по схеме звезды или треугольника. Возможен вариант, когда используется для экспериментального макета трёхфазная обмотка асинхронного или вентильного электродвигателя с ферромагнетиком [9] внутри, например, из редкоземельных материалов типа самарий–кобальт или неодим–железо–бор. Что касается сплава 35 ЮНДК, то он имеет значительно меньшую коэрцетивную силу, но при этом его можно применять на стадии эксперимента.

При использовании вентильного электродвигателя, применяемого на КА, где распространено напряжение питания постоянного тока (27 В), необходим полупроводниковый коммутатор с транзисторными ключами, коммутирующими поочередно обмотки по сигналу, например, снимаемому с лобовых частей обмоток или датчика положения ротора параллельного включённого второго электродвигателя, для проведения экспериментально-любительской радиосвязи. Это или датчики Холла, или датчик положения ротора, имеющий свою обмотку и постоянный электромагнит. При наземных испытаниях коэффициент усиления возможно будет измерить методом двух идентичных антенн – передающей и приемной, когда достаточно измерить мощность магнитоэлектрических сигналов, поступающих в передающую антенну от передатчика в приемное устройство [10].

Известно [11], что первая телефонная спутниковая связь между Америкой и Великобританией была налажена через массивный экспериментальный американский спутник Echo1, запущенный на низкую околоземную орбиту 12 августа 1960 г., который представлял собой шар диаметром около 30 м, изготовленный из радиоотражающего материала.

Тип такого спутника связи можно применить и в предлагаемой радиосвязи. Однако поскольку приемные и передающие антенны являются узконаправленными, то КА должен иметь на орбите такую ориентацию, чтобы он принял сигнал и отразил его. Диаметр сферы при этом может быть значительно меньших размеров, а его геометрические характеристики должны будут измеряться при наземной экспериментальной отработке в термовакуумных условиях. При ориентации одну ось можно будет стабилизировать вращением с помощью гиромаховика, а положение на орбите удерживать корректирующей двигательной установкой, расположенной в центре масс.

Антенны из сетеволокна. Радиоотражающая поверхность может быть выполнена из надувной пленки или сетеполотна, изготовленного, например, из позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром порядка 30 мкм, разворачиваемого в сферу в трансформируемой конструкции. Возможен вариант выполнения сетеполотна из магнитно-мягкого материала типа сталей Э8, Э10, железа «Армко» или пермаллоя, которые являются идеальными проводниками магнитных потоков и не требуют охлаждения до криогенных температур. Технология изготовления такого сетеволокна подробно описана в патенте 2198453 [12], а его применение в качестве отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн описано в работе [13].

Заключение. Проведенный анализ состояния вопроса показал возможность построения радиосвязи с помощью орбитальных отражателей и магнитных антенн вращающейся поляризации, которые должны связывать излученную в пространстве электромагнитную энергию с электронными компонентами аппаратуры при использовании для этой цели относительно дешевых маложивущих микроспутников, которые можно выводить на низкие орбиты экипажем космической станции. Подобная телефонная связь между Америкой и Великобританией была реализована с использованием спутника в виде шара, изготовленного из радиоотражающего материала, что предлагается применить и в настоящей работе. Однако поскольку приемные и передающие антенны являются узконаправленными, то космический аппарат должен иметь ориентацию, обеспечивающую прием и отражение сигнала. При этом радиоотражающая поверхность может быть выполнена из пленки или сетеполотна, изготовленного из вольфрамовой проволоки, или из магнитно-мягкого материала типа сталей Э8, Э10, железа «Армко» или пермаллоя, которые являются идеальными проводниками магнитных потоков и не требуют охлаждения до криогенных температур.

Библиографические ссылки

1. Армизонов Н. Е., Армизонов А. Н. Магнитные антенны вращающейся поляризации – путь эффективного использования радиочастотного спектра // Авиакосмическая техника и технология. 2014. № 2. С. 30–37.
2. Артеменко Ю. Н., Карпенко А. П., Волкоморов С. В. Возможности механизмов параллельной структуры для ориентации космического телескопа «МИЛЛИМЕТРОН» [Электронный ресурс] // Наука и образование. 2014. № 11. С. 357–370. URL: http://technomag.bmstu.ru/ doc/740118.html (дата обращения: 27.02.2015).
3. Assis K. T., Neves M. C. D. History of the 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson // Apeiron. 1995. Vol. 2, № 3. P. 79–84.
4. Penzias A. A. and Wilson R. W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s // Astrophysical Journal. 1965. Vol. 142. P. 419–421.
5. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. М. : Мир, 1987. 224 с.
6. Условия использования выделенных полос радиочастот [Электронный ресурс]. URL: http://omskair.ru/ index.php/o-vydelenii-polos/167-plan-chastot-lyubitelskikh-kv-diapazonov-nch-lf-sch-mf-i-vch-hf.html (дата обращения: 27.02.2015).
7. Шайдуров Г. Я. Основы теории и проектирования радиотехнических систем / Сибирский федеральный университет. Красноярск, 2010. 283 с.
8. Радин В. И., Брускин Д. Е., Захарович А. Е. Электрические машины. М. : Выс. шк., 1988. 328 с.
9. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М. : Наука, 1985. 512 с.
10. Лавров В. И., Сомов В. Г., Сивирин П. Я. Измерение параметров крупногабаритных бортовых антенн спутниковых систем связи / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. 152 с.
11. Ротхамель К., Кришке А. Антенны. М. : Данвел, 2005. 416 с.
12. Пат. 2198453 Российская Федерация, C1 МПК[7] H 01 Q 15/14, D 04 B 21/12. Отражательная вязаная сетчатая поверхность антенны и способ ее выработки / Кудрявин Л. А., Халиманович В. И., Завaруев В. А. и др. № 2002100718/12 от 17.01.2002 // Открытия, изобретения. 2003. № 4.
13. Трикотажные металлические стеклополотна для отражающей поверхности трансформируемых наземных и космических антенн / О. Ф. Беляев [и др.] // Технический текстиль. 2007. № 16. С. 59−64.

References

1. Armizonov N. E., Armizonov A. N. [Magnetic antenna polarization rotating – the way of the efficient use of spectrum radiocaster]. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2014, No. 2, P. 30–37 (In Russ.).
2. Artemenko Yu. N., Karpenko A. P., Volkomorov S. V. [The possibility of parallel mechanisms for orientation space Observatory “MILLIMETRON”]. *Nauka i obrazovanie*. 2014, No. 11, P. 357–370 (In Russ.).
3. Assis K. T., Neves M. C. D. History of the 2.7 K Temperature Prior to Penzias and Wilson. *Apeiron*. 1995, Vol. 2, No. 3, P. 79–84.
4. Penzias A. A., Wilson R. W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophysical Journal*. 1965, Vol. 142, P. 419–421.
5. Etkins P. *Poryadok i besporyadok v prirode* [Order and disorder in nature]. Moscow, Mir Publ., 1987, 224 p.
6. *Usloviya ispol'zovaniya vydelennykh polos radiochastot* [Terms of use of the allocated frequency bands]. Available at: http://omskair.ru/index.php/o-vydelenii-polos/ 167-plan-chastot-lyubitelskikh-kv-diapazonov-nch-lf-sch-mf-i-vch-hf.html (accessed 27.02.2015).
7. Shaydurov G. Ya. *Osnovy teorii i proektirovaniya radiotekhnicheskikh sistem* [Fundamentals of the theory and design of radio systems]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2010, 283 p.
8. Radin V. I., Bruskin D. E., Zakharovich A. E. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 328 p.
9. Yavorskiy B. M., Detlaf A. A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 512 p.
10. Lavrov V. I., Somov V. G., Sivirin P. Ya. *Izmerenie parametrov krupnogabaritnykh bortovykh antenn sputnikovykh sistem svyazi* [The measurement of large-size on-Board antennas to satellite communication systems]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2010, 152 p.
11. Rotkhamel' K., Krishke A. *Antenny* [Antennes]. Moscow, Danvel Publ., 2005, 416 p.
12. Kudryavin L. A., Khalimanovich V. I., Zavaruev V. A. et al. *Otrazhatel'naya vyazanaya setchataya poverkhnost' antenny i sposob ee vyrabotki* [Reflective knitted mesh surface of the antenna and its production method]. Patent RF, no. 2198453, 2003.
13. Belyaev O. F., Zavaruev V. A., Kudryavin, Khalimanovich V. I. et al. [Knitted metal Steklovolokno to the reflecting surface of the variable loading of terrestrial and space antennas]. *Tekhnicheskiy tekstil'*. 2007, No. 16, P. 59–64 (In Russ.).

© Тестоедов Н. А., Двирный В. В., Крушенко Г. Г., Двирный Г. В., 2015

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 368–375

К ПРОБЛЕМЕ ГЕНЕРАЦИИ ВЫБОРКИ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Е. А. Чжан

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79/10
E-mail: ekach@list.ru

Рассматривается задача повышения качества исходных данных при идентификации Н-процессов. Входные переменные такого рода процессов связаны стохастической зависимостью, вследствие этого процесс протекает не в гиперкубе, а лишь в некоторой его подобласти. Этот факт приводит к некоторым особенностям, которые необходимо учитывать при идентификации. При построении моделей в условиях большого объема априорных данных можно воспользоваться методами идентификации в широком смысле. Однако если нет достаточной априорной информации об изучаемом объекте, то необходимо применять методы идентификации в узком смысле. К таким методам относятся непараметрические оценки функции регрессии по наблюдениям.

Качество решения задачи идентификации зависит от качества исходных данных. Целесообразно провести предварительный анализ данных для выявления и устранения всех недостатков в выборке. Под предварительным анализом данных принято понимать заполнение пробелов в наблюдениях и устранение выбросов. Подобного рода задачи встречаются при диагностике ракетных двигателей, процессов изготовления изделий электронной техники и др. Однако выборка может обладать другими дефектами (речь о них пойдет ниже), которые негативно влияют на точность оценивания, а в некоторых случаях приведут к тому, что полученная модель будет неадекватна исследуемому процессу. Если точки исходной выборки в области протекания процесса расположены неоднородно, присутствуют области разреженности и отсутствия наблюдений, то в таких областях точность восстановления будет низкой. Вследствие свойств непараметрических моделей, которые относятся к классу локальных аппроксимаций, прогноз в областях отсутствия наблюдений может оказаться достаточно грубым. Для устранения всех этих недостатков предлагается алгоритм получения рабочей выборки путем генерации новых точек в областях, где их плотность по сравнению с остальными областями невелика. После генерации новой рабочей выборки качество восстановления значительно улучшается, что подтверждается результатами численных экспериментов. Подобного рода алгоритмы являются актуальными и могут быть использованы при решении задачи распознавания в различных областях, где важна точность классификации.

Ключевые слова: идентификация, безынерционный объект, Н-процесс, выборка, анализ данных, непараметрическое моделирование.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 368–375

TO THE PROBLEM OF GENERATION SAMPLE IN SOLVING THE PROBLEM OF NON INTERIAL PROCESSES IDENTIFICATION

E. A. Chzhan

Siberian Federal University
79/10, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: ekach@list.ru

The problem of improving the quality of the original data in the identification of H-processes is considered. There is stochastic dependence between input variables of such processes so this process precedes not at all the regulated area but only at some of its subdomain. This fact leads to some features that must be considered when identifying. If there is large number of a priori data when building models, you can use the methods of identification in the “broad” sense. However, if there is sufficient a priori information about the object being studied, it is necessary to apply the methods of identification in the “narrow” sense. These methods include nonparametric estimation of regression function from observations.

The quality of solving the problem of identification depends on the quality of input data. It is advisable to conduct a preliminary analysis of data to identify and address all the deficiencies in the sample. Under the preliminary analysis of the data is taken to mean filling gaps in observations and eliminating emissions. However, the sample may have other

flaws, that will be discussed below, which adversely affect the accuracy of estimation, and, in some cases, lead to the fact that the resulting model will be inadequate to the investigated process. If the point of the original sample in the field of process located patchy, there are low-pressure range and lack of observations, in the areas of reconstruction accuracy is low. Due to the properties of nonparametric estimation, which belongs to the class of local approximations, projections can not be given at the lack of observations subdomain. To resolve all these shortcomings we propose an algorithm to obtain a working sample by generating new points in regions where the density is low in comparison with other areas. After generating new working sample, the quality of estimation is significantly improved, as evidenced by the results of numerical experiments. This kind of tasks are relevant and can be used in solving the problem of recognition in various fields, where the classification accuracy is important, for example, in the diagnosis of space propulsion, electrical, etc.

Keywords: identification, noninterial processes H-process, sample, data analysis, non-parametric modeling.

Введение. Проблема идентификации статических систем с запаздыванием остается актуальной в настоящее время в связи с тем, что во многих технологических процессах основной показатель измеряется с большой дискретностью, причем дискретность может значительно превышать постоянную времени объекта. Другими словами, значение показателя может быть получено после того, как процесс уже закончился. Таким образом, данный показатель невозможно использовать при непосредственном управлении процессом, поэтому управление приходится осуществлять по косвенным показателям, измерения которых доступны, например, электрическими средствами. Это приводит к тому, что динамический объект часто следует рассматривать как статический или безынерционный с запаздыванием. Подобная ситуация типична для многих дискретно-непрерывных процессов металлургии, нефтепереработки, а также космической отрасли, в частности, при изготовлении и диагностике ракетных двигателей, изделий электронной техники (ИЭТ). Так, космический аппарат может содержать более 100 тыс. ИЭТ.

При идентификации безынерционных объектов с запаздыванием часто возникает ситуация, когда компоненты вектора входных переменных стохастически зависимы, причем характер этой зависимости неизвестен. Это приводит к тому, что в гиперкубе, определяемом диапазонами изменения входных-выходных переменных объекта, реальный процесс имеет «трубчатую» структуру, т. е. является *H*-процессом. При идентификации подобных объектов целесообразно использовать алгоритмы из класса локальных аппроксимаций. В этом случае важная роль принадлежит распределению элементов выборки в гиперкубе, которые часто обладают некоторыми особенностями, в частности, наличием подобластей, представляющих собой «сгущения» и «разрежения». Настоящая работа посвящена ослаблению влияния этих особенностей на решение задач идентификации.

Постановка задачи. Задача идентификации состоит в построении оптимальной модели исследуемого объекта на основе всей доступной априорной информации [1; 2]. Однако прежде чем перейти к решению задачи идентификации, имеет смысл провести предварительный анализ данных для улучшения их качества. Рассмотрим общую схему исследуемого процесса (рис. 1).

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $x(t)\in\Omega(x)\subset R^1$ – выходная переменная процесса, $u(t)\in\Omega(u)\subset R^m$ – векторное входное воздействие, $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие, G^{ui}, $i=\overline{1,m}$, G^x – каналы связи для входных и выходных переменных. В каналах связи действуют случайные помехи $g^{ui}(t)$, $i=\overline{1,m}$, $g^x(t)$ с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией. Получая измерения входных и выходных переменных, имеем выборку наблюдений $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$. По этой выборке необходимо получить модель изучаемого процесса.

Особенность рассматриваемых процессов состоит в том, что между входными переменными существует стохастическая зависимость. Такого рода процессы будем называть «трубчатыми» или *H*-процессами [3; 4].

***H*-процессы.** Из соображений простоты рассмотрим трехмерный объект: $u_1\in\Omega(u_1)\subset R^1$, $u_2\in\Omega(u_2)\subset R^1$, $x\in\Omega(x)\subset R^1$ (рис. 2).

Входные переменные процесса связаны стохастической зависимостью, вид которой исследователю неизвестен. Интервалы изменения входных-выходных переменных $(u_1, u_2, x) \in R^3$ всегда известны из технологического регламента, технических условий или из требований ГОСТ. Без нарушения общности выделим в R^3 единичный куб. На рис. 2 куб – это область, ограниченная интервалами измерения переменных, область возможных значений согласно требованиям. Реально протекающий процесс же принадлежит подобласти $\Omega^H(u_1, u_2, x)\in \Omega(u_1, u_2, x)$, которая никогда не известна.

Таким образом, $u_1\in[0;1]$, $u_2\in[0;1]$, $x\in[0;1]$, а триада $(u_1, u_2, x)\in \Omega^H (u_1, u_2, x)$. Ясно, что каждое значение триады (u_1, u_2, x), полученной в эксперименте или измеренной на реальном процессе, будет принадлежать единичному кубу $\Omega(u_1, u_2, x)$. Следует отметить, что в теории идентификации области $\Omega(u_1, u_2, x)$, $\Omega(u_1, u_2)$, $\Omega(u_1)$, $\Omega(u_2)$, $\Omega(x)$ всегда известны, а область $\Omega^H(u_1, u_2, x)$ не известна никогда. В случае стохастической независимости входных переменных процесса $\Omega^H(u_1, u_2, x)$ совпадает с $\Omega(u_1, u_2, x)$, т. е. $\Omega^H (u_1, u_2, x) = \Omega(u_1, u_2, x)$.

Исходная выборка, полученная при измерении входных и выходных переменных, принадлежит области $\Omega^H(u_1, u_2, x)$. Однако при управлении или получении прогноза для такого рода процессов необходимо задавать значения входных переменных, которые будут принадлежать области $\Omega^H(u_1, u_2)$. Вид этой области $\Omega^H(u_1, u_2)$, а также какие из компонент вектора входа являются зависимыми, а какие свободными – это априорно исследователю неизвестно, но должно быть учтено при идентификации.

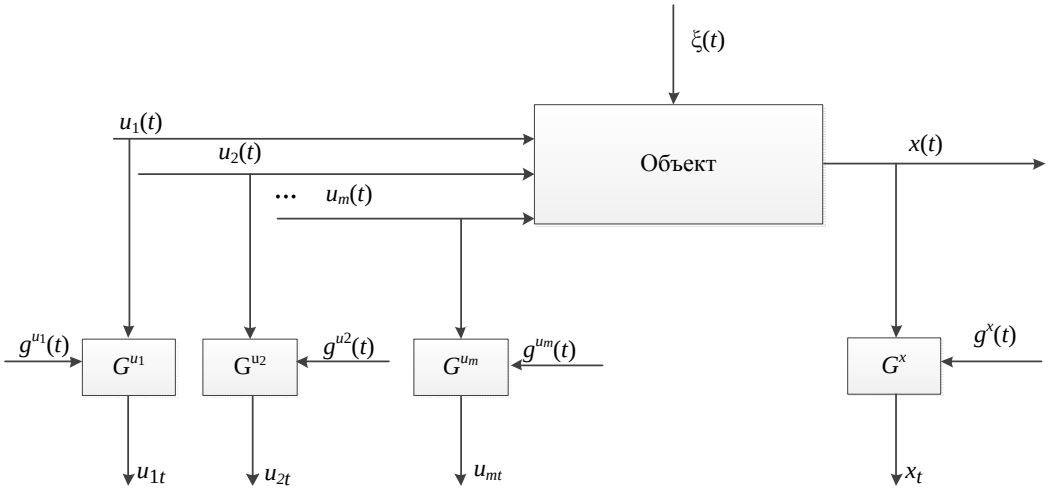


Рис. 1. Общая схема исследуемого процесса

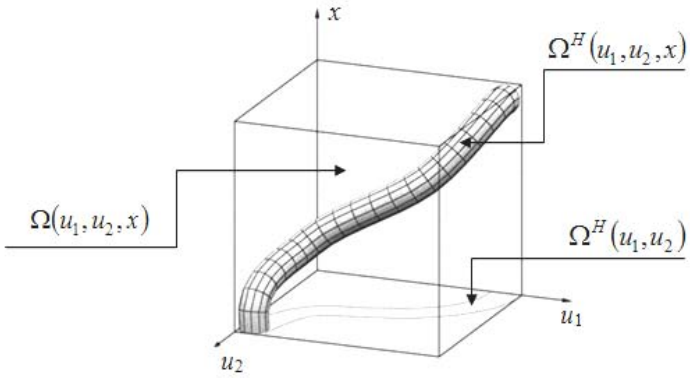


Рис. 2. Общая схема «трубчатого» процесса

Идентификация в узком и широком смысле. Рассмотрим методы решения задачи идентификации. При идентификации в узком смысле делается предположение о виде математической модели с точностью до параметров. В этом случае необходим большой объем сведений об объекте, которым в большинстве случаев исследователь не располагает. Затем на основании матрицы наблюдений оцениваются параметры модели. Очевидно, что ошибка при выборе структуры в самом начале может привести к неадекватной модели, которую невозможно использовать в дальнейшем в целях получения прогноза желаемых характеристик или в задачах управления. При решении практических задач, идентификации производственных процессов исследователю известен лишь набор характеристик, влияющих на процесс, но каким образом связаны входные и выходные переменные, какие переменные являются существенными, а какие можно опустить – все это остается неизвестным. Исследователь располагает лишь матрицей наблюдений входных и выходных переменных, описанием переменных и качественными сведениями о процессе (однозначный или неоднозначный, динамический или статический и т. д.). В этом случае целесообразно использовать методы идентификации в широком смысле. В качестве такой модели может быть использована непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям Надарая–Ватсона [5; 6].

Рассмотрим объект (рис. 1), имеющий m входных переменных $u = u^1, u^2, \ldots, u^m$ и одну выходную переменную x. Измеряя входные-выходные переменные, получим выборку наблюдений $\left\{u_i, x_i, i = \overline{1,s}\right\}$ случайных величин x, u, распределенных с неизвестными плотностями вероятности $p(x,u)$, $p(u) > 0$ $\forall u \in \Omega(u)$. Для восстановления $\hat{x} = M\left\{x \mid u\right\}$ используются непараметрические оценки [5; 6]:

$$x_s\left(u\right) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{m} \Phi\left(c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)\right)}, \qquad (1)$$

где $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), i = \overline{1,s},\ j = \overline{1,m}$ – ядерная колоколообразная функция и коэффициент размытости ядра c_s удовлетворяют следующим условиям [5; 6]:

$$c_s > 0; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s = 0;$$

$$\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) \geq 0; \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))du^j < \infty; \qquad (2)$$

$$\lim_{s\to\infty} sc_s^m = \infty; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \delta(u^j - u_i^j).$$

В качестве колоколообразной функции Ф(z), $z = c_s^{-1}\left(u^j - u_i^j\right)$ могут быть использованы ядерные функции. Ядерная функция – это непрерывная ограниченная симметричная вещественная функция с единичным интегралом [7].

Рассмотрим в качестве ядерной функции параболическое ядро (ядро Епанечникова):

$$\Phi(z) = \begin{cases} 0,75\left(1 - z^2\right), \text{если } |z| \le 1, \\ 0, \text{если } |z| > 1. \end{cases} \quad (3)$$

Для получения прогноза выхода объекта в точке $u^j = \left(u_1^j, u_2^j, \ldots, u_m^j\right)$ необходимо по определенному правилу усреднить значения выхода для всех соседних точек выборки. Качество восстановления непараметрической оценки функции регрессии напрямую зависит от равномерности распределения точек в исходной выборке.

Недостатки в исходной выборке наблюдений. Для повышения точности решения задачи идентификации предлагается проводить предварительный анализ данных (устранение пробелов и выбросов) [8]. На сегодняшний день широко развиты параметрические методы заполнения пропусков, основанные на гипотезе о нормальном распределении выборки [9]. При решении реальных задач возникает проблема улучшения качества данных [10]. В космической отрасли, при проектировании ракет и летательных аппаратов, вопрос качества данных стоит наиболее остро. Игнорирование проблемы недостатков в исходных данных приводит к масштабным катастрофам, например, падение космического шаттла Challenger или ошибка, которая привела к тому, что иранский самолет Airbus был сбит ракетным крейсером USS Vincennes. Естественно, что причиной тому послужил ряд факторов, но некоторые авторы обращают внимание на очевидные проблемы в качестве данных [11]. Проблема качества возникает не только при решении задачи идентификации, но также при диагностике [12–15].

Кроме того, точки в исходной выборке могут располагаться неравномерно – существуют места разреженности и пропусков (рис. 3). Для простоты рассуждения и иллюстрации рассмотрим «трубчатый» объект, имеющий две входные переменные и одну выходную (рис. 2). Поле корреляции такого объекта может иметь вид, представленный на рис. 4. Как видно из рис. 4, выборка расположена неравномерно.

Исходная выборка имеет изъяны – области разреженности и отсутствия наблюдений. В местах разреженности непараметрическая оценка будет давать неточный результат, т. е. прогноз в таких областях будет иметь малую точность. Этот факт связан с тем, что при рассмотрении точек из этих областей под колокол ядерной функции (3) при восстановлении оценки (2) будет попадать малое число точек.

В областях отсутствия наблюдений или пропуска процесс существует. Если же необходимо получить значение прогноза в таких областях, то в результате восстановления непараметрической оценки получится неопределенность, так как под колокол не попадет ни одной точки. Для улучшения качества восстановления, получения адекватных оценок предлагается алгоритм, который позволит генерировать новые точки в областях разреженности и пропусков. Сгенерированные точки и исходная выборка будет представлять собой рабочую выборку, которую в дальнейшем будем использовать при восстановлении оценки (1).

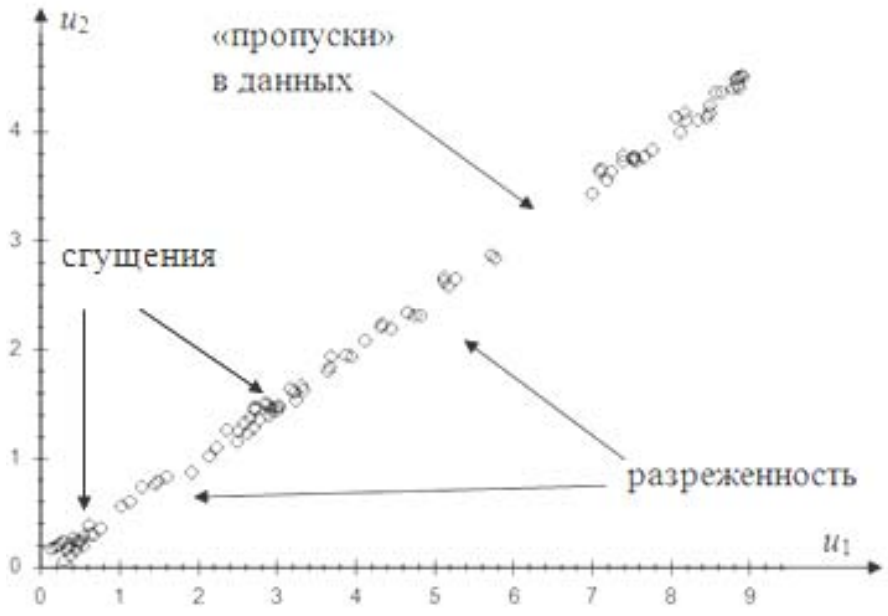


Рис. 3. Поле корреляции по входным переменным u_1, u_2

Алгоритм генерации рабочей выборки:

1. По исходной выборке $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$ вычисляем с помощью скользящего экзамена величину параметра размытости ядра c_s.

2. Для каждой точки выборки считаем число точек ρ_i, которое попадает под колокол с радиусом c_s. Находим среднее число точек под колоколом $\rho_{ср.}$

3. Находим начальную точку u^0 с минимальными значениями по каждой переменной. Данная точка будет начальным центром масс $\dot{u}$.

4. Находим точки выборки $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$, которые попадут под колокол с центром в точке $\dot{u}$. Все найденные точки исключаем из выборки $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$, получаем выборку $\left\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i=\overline{1,s'}\right\}$, $s' << s$.

5. Для полученных точек находим координаты центра масс.

6. Если координаты точки центра масс на текущей и предыдущей итерации совпадают, то переходим к шагу 7. Если не совпадают, то повторяем шаги 4, 5.

7. Находим для текущего центра ближайшую точку из выборки $\left\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i=\overline{1,s'}\right\}$, т. е. точку, расстояние до которой минимально.

8. Относительно найденной точки проделываем шаги 4, 5. Полученный центр масс обозначим u'.

9. Имеем два центра масс $\dot{u}$, u'. Вычисляем евклидово расстояние d между этими точками:

$$d=\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\left(\dot{u}_i-u_i'\right)^2}. \qquad (4)$$

10. Вычислим коэффициент k:

$$k=d/2c_s.$$

11. Между точками $\dot{u}$, u' генерируем n точек, где $n=k\cdot\rho_{ср}$.

12. Если в выборке $\left\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i=\overline{1,s'}\right\}$ присутствуют точки, т. е. $s'\neq 0$, то переходим к шагу 4, где в качестве точки $\dot{u}$ берем точку u'. Если $s'=0$, то поиск закончен, все пропуски заполнены.

Вычислительный эксперимент. Для простоты иллюстрации и рассуждения рассмотрим *H*-процесс, имеющий две входные переменные u_1, u_2 и выходную переменную *x*. Входные переменные распределены в интервале [0;3] и связаны следующей стохастической зависимостью:

$$u_2=0,5u_1+\phi, \qquad (5)$$

где ϕ – случайная величина, распределенная по равномерному закону с нулевым математическим ожиданием.

Математическое описание выхода объекта имеет следующий вид:

$$x(u)=1,5u_1-2u_2+\xi, \qquad (6)$$

где ξ – случайная величина, распределенная по равномерному закону с нулевым математическим ожиданием.

Вид зависимости (5) и (6) задан лишь для получения исходной выборки, проведения экспериментов. В дальнейшем знание о структуре зависимости не используется.

В качестве модели примем непараметрическую оценку (1). О качестве моделирования будем судить по относительной ошибке аппроксимации:

$$W=\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}\left(x_i-x_{si}\right)^2, \qquad (7)$$

где $x_i, i=\overline{1,s}$ – выход объекта (6); $x_{si}, i=\overline{1,s}$ – выход модели (1).

В качестве исходной выборки было взято 200 точек: $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,200}\right\}$. Поле корреляции по входным переменным имеет вид, представленный на рис. 3. По исходной выборке была вычислена ошибка (7): $W_{до}=0,023$. Затем с помощью предложенного алгоритма было сгенерировано 40 точек. Таким образом, новая рабочая выборка имеет объем 240 точек (рис. 4, где крестиками показаны сгенерированные точки). Как видно из рис. 4, места разреженности и пропусков заполнены. Точки новой выборки расположены однородно, вследствие чего качество восстановления должно значительно улучшиться. В точках исходной выборки была восстановлена оценка (1), где в качестве обучающей выборки была использована рабочая выборка. В этом случае оценка уменьшилась почти в 3 раза и составила $W_{после}=0,009$.

Можно сделать вывод, что генерация новых точек в областях разреженности и пропусков приводит к увеличению точности построенной модели.

Восстановления непараметрической оценки на границе. Данный алгоритм основан на генерации новых точек. Данные точки используются лишь при восстановлении оценки выхода модели в реальных точках исходной выборки. Эту идею можно использовать при вычислении прогноза выхода объекта, если стохастическая зависимость между входными переменными отсутствует:

1. По исходной выборке $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$ вычисляем с помощью скользящего экзамена величину параметра размытости ядра c_s.

2. Для каждой точки выборки находим число точек $\rho_{ср}$, которое попадает под колокол с радиусом c_s.

3. Из основной выборки $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$ выбираем 30 % точек $\left\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i=\overline{1,s'}\right\}$, $s'=0,3s$ с наибольшим числом точек под колоколом: $\rho_i(u',x') < \rho_{ср}(u', x')$.

4. Для точек выборки $\left\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i=\overline{1,s'}\right\}$, $s'=0,3s$ вычисляем $\rho_{ср}$.

5. Для всех точек выборки $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,s}\right\}$ проверяем условие: $\rho_i < \rho_{ср}$. Если условие выполняется, то генерируем k точек в c_s окрестности точки i, где $k = \rho_{ср} - \rho_i$.

6. Для всех сгенерированных точек вычисляем выход модели по непараметрической оценке функции регрессии.

Таким образом, будем генерировать точки в окрестности тех точек, которые имеют меньшее по сравнению с остальными точками выборки число соседей. Под это определение попадают точки, которые находятся на границе. Генерация новых точек осуществляется для использования их при восстановлении непараметрической оценки (1). При использовании новой рабочей выборки автоматически происходит улучшение оценки на границе.

Вычислительный эксперимент. Рассмотрим результаты численных экспериментов. В качестве математического описания объекта примем формулу (6). Объект имеет 2 входные переменные и одну выходную, значения входных переменных распределены в интервале [0;3]. В данном случае входные переменные не связаны между собой. Таким образом, имеется выборка $\left\{u_i, x_i, i=\overline{1,200}\right\}$. Исходная выборка описывает поведение объекта, при построении моделей реальных процессов данная выборка может быть получена путем измерения значений входных и выходных переменных процесса. Поле корреляции по входным переменным будет иметь вид, представленный на рис. 5. В данном случае точки выборки расположены неоднородно, качество восстановления оценки регрессии будет низкое не только в граничных точках, но и в местах разреженности.

По выборке восстановим непараметрическую оценку регрессии (1). Относительная ошибка восстановления по исходной выборке до генерации новых точек составила $W_{\text{до}} = 0{,}028$.

Для данного двумерного случая область значения входных переменных $\Omega(u_1,\ u_2)$ представляет собой прямоугольник, стороны которого нам известны из области значения переменных u_1 и u_2. Прямоугольник – регламентированная область протекания процесса. Однако сами граничные точки могут и не принадлежать сторонам данного прямоугольника. Граничными точками будут являться те, которые находятся на минимальном расстоянии от сторон данного прямоугольника. Для улучшения восстановления оценки на границе нет необходимости специально выделять граничные точки, так как генерация происходит в тех областях, где при восстановлении непараметрической оценки под колоколом попадет небольшое число точек. Граничные точки такими и являются. Однако для того, чтобы убедиться, что восстановление в таких точках происходит с использованием новой рабочей выборки, посчитаем относительную ошибку (2) только для граничных точек: $W'_{\text{до}} = 0{,}058$. Данная ошибка значительно хуже, чем ошибка аппроксимации для всей выборки.

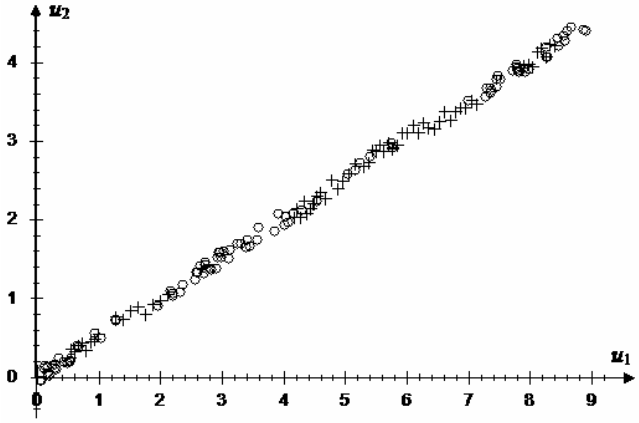


Рис. 4. Поле корреляции *H*-процесса
по входным переменным u_1, u_2 после заполнения

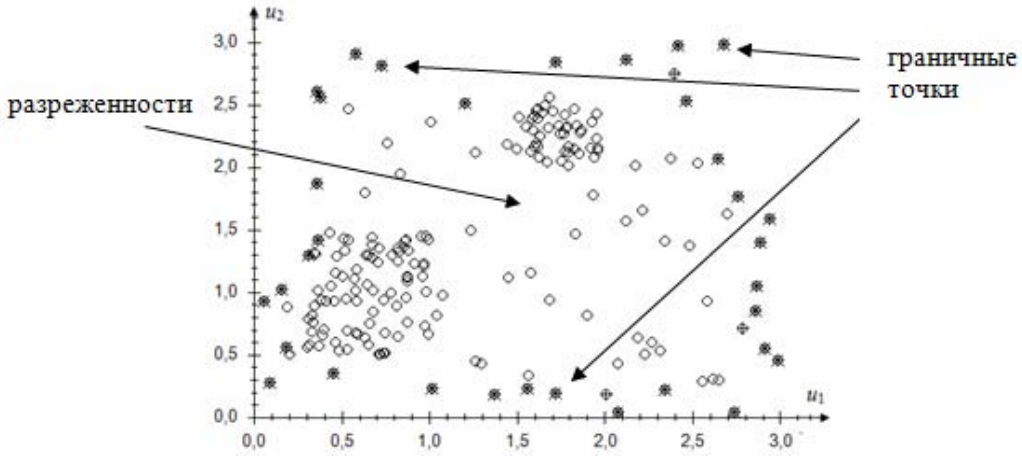


Рис. 5. Поле корреляции по входным переменным u_1, u_2 до заполнения

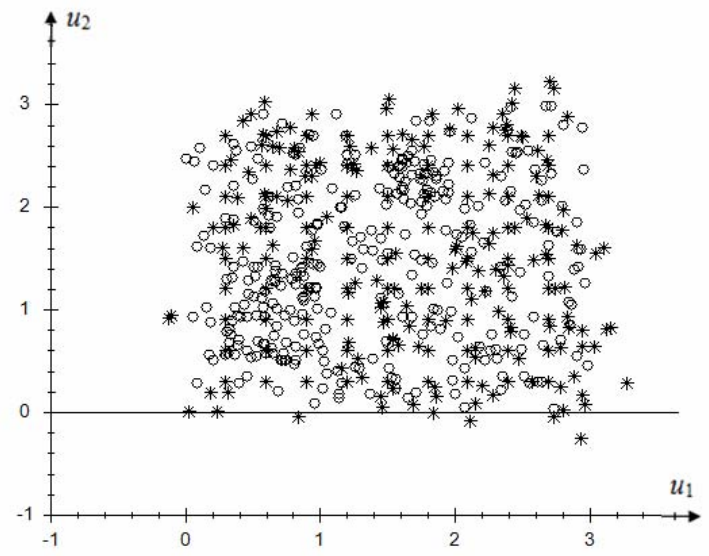


Рис. 6. Поле корреляции по входным переменным u_1, u_2 после заполнения

Из рис. 6 видно, что в выборке присутствуют области разреженности и пустот. С помощью предложенного алгоритма дополним исходную выборку новыми точками. Поле корреляции по входным переменным после генерации новых точек представлено на рис. 6, где кружки – это точки исходной выборки, звездочки – сгенерированные точки. В данном случае после работы вышеописанного алгоритма были сгенерированы точки в тех областях, где их плотность была невелика по сравнению со всей выборкой. Таким образом, в новой рабочей выборке (рис. 6) отсутствуют места пустот и разреженности – при восстановлении оценки под колокол попадет большее количество точек, и оценка будет точнее. Используя новую рабочую выборку, будем восстанавливать оценку (1) в точках исходной выборки. Относительная ошибка уменьшилась в 2 раза: $W_{\text{после}} = 0{,}014$. Также по новой выборке восстановим выход модели в граничных точках: $W'_{\text{после}} = 0{,}021$.

Таким образом, алгоритм получения новой рабочей выборки позволит улучшить качество исходных данных.

Заключение. Решение задачи идентификации затрудняет как малый объем исходных данных, так и наличие в них изъянов. В данной работе рассмотрены такие недостатки, как подобласти разреженности и отсутствия наблюдения. Для их устранения предложен алгоритм генерации новой рабочей выборки, что позволит повысить качество восстановления.

Библиографические ссылки

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 681 с.

2. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984, 320 с.

3. Медведев А. В. Некоторые замечания к *H*-моделям безынерционных процессов с запаздыванием // Вестник СибГАУ. 2014. № 2 (54). С. 50–55.

4. Корнеева А. А., Сергеев А. Н., Чжан Е. А. Исследование непараметрических моделей процессов трубчатого типа // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 44–49.

5. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983. 174 с.

6. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой. Тбилиси : Изд-во Тбилис. ун-та, 1983. 194 с.

7. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М. : Мир, 1993. 352 с.

8. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : Изд-во ИМ СО РАН, 1999. 264 с.

9. Bayesian data analysis / A. Gelman [et al.]. CRC press, 2013.

10. Kantardzic M. Data mining: concepts, models, methods, and algorithms. John Wiley & Sons, 2011.

11. Fisher C. W., Kingma B. R. Criticality of data quality as exemplified in two disasters // Information & Management. 2001. Т. 39, № 2. С. 109–116.

12. Gillies D., Thornley D., Bisdikian C. Probabilistic approaches to estimating the quality of information in military sensor networks // The Computer Journal. 2010. Т. 53, № 5. С. 493–502.

13. Ваганов М. А., Москалец О. Д., Кулаков С. В. Многоканальный спектральный прибор для диагностики жидкостного ракетного двигателя // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 2–6.

14. Мухин С. В., Ребенков А. В. Перспективы развития информационно-измерительных и управляющих систем для испытания жидкостного ракетного двигателя на стенде химзавода – филиала ОАО «КРАСМАШ» // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. (10–12 ноября 2010, г. Красноярск). Ч. 1. С. 261–266.

15. Орлов В. И., Сергеева Н. А. О непараметрической диагностике и управлении процессом изготовления электрорадиоизделий // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 70–75.

References

1. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya* [System Identification Parameter and State Estimation]. Moscow, Mir Publ., 1975, 683 p.

2. sypkin Ya. Z. *Osnovy informatsionnoy teorii identifikatsii* [The foundation of information identification theory]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p.

3. Medvedev A. V. [Some remarks on the H-model inertialess processes with delay]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 2 (54), P. 50–55 (In Russ.).

4. Korneeva A. A., Sergeev A. N., Chzhan E. A. [Investigation of nonparametric models of tubular type processes]. *Vestnik SibGAU*. 2012, No. 5 (45), P. 44–49 (In Russ.).

5. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric adaptation systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, 174 p.

6. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie otsenki plotnosti veroyatnosti i krivoy regresii* [Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve]. Tbilisi, Tbilisi University Publ., 1983, 194 p.

7. Khardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* [Applied Nonparametric Regression]. Moscow, Mir Publ., 1993, 352 p.

8. Zagoruyko N. G. *Prikladnye metody analiza dannykh i znaniy* [Applied methods of data and knowledge analysis]. Novosibirsk, IM SO RAN Publ., 1999. 264 p.

9. Gelman A. et al. Bayesian data analysis. CRC press, 2013.

10. Kantardzic M. Data mining: concepts, models, methods, and algorithms. John Wiley & Sons, 2011.

11. Fisher C. W., Kingma B. R. Criticality of data quality as exemplified in two disasters. *Information & Management.* 2001, Vol. 39, No 2, P. 109–116.

12. Gillies D., Thornley D., Bisdikian C. Probabilistic approaches to estimating the quality of information in military sensor networks. *The Computer Journal*. 2010, Vol. 53, No 5, P. 493–502.

13. Vaganov M. A., Moskalets O. D., Kulakov S. V. [Multichannel spectral devices for the diagnosis of liquid rocket engines]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, No 1 (62), P. 2–6 (In Russ.).

14. Mukhin S. V., Rebenkov A. V. [Prospects for the development of information-measuring and control systems for liquid rocket engine test stand at the chemical plant-branch of “Krasmash”]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf.* [Reshetnev Readings: materials XIV Intern. scientific. Conf.]. Krasnoyarsk, 10-12, November 2010, Part 1. P. 261–266 (In Russ.).

15. Orlov V. I., Sergeeva N. A. [Nonparametric diagnosis and control of the process of making electronic component]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 2 (48), P. 70–75 (In Russ.).

© Чжан Е. А., 2015

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

УДК 629.78.05

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 378–385

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Р. В. Ахметжанов[1], А. В. Богатый[1], П. А. Дронов[2], Г. А. Дьяконов[1*], А. В. Иванов[2]

[1]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Российская Федерация, 125080, г. Москва, Ленинградское шоссе, 5
[2]ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики»
Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. Ворошилова, д. 20. [*]E-mail: riame3@sokol.ru

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений в мировой космической отрасли является разработка и применение малых космических аппаратов (МКА). Анализ современных тенденций развития рынка КА показывает, что функционирование ряда систем могут обеспечивать МКА массой от 100 до 500 кг, размещенные на низких (до 1000 км) орбитах. Существует объективная потребность в средствах поддержания и коррекции орбит МКА массой 100…500 кг, способных обеспечить получение высококачественной информации в течение 5…10 лет, для чего на МКА необходимо ставить двигатели управления орбитальным движением, в качестве которых могут быть использованы электроракетные двигатели (ЭРД). Типичные сроки активного существования МКА массой до 500 кг, не оснащенных ЭРД, ограничиваются 2…3 годами.

В 2010 г. в МАИ была создана лаборатория высокочастотных ионных двигателей. За последующие годы был накоплен значительный опыт в области исследования высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) с различными потребляемыми мощностями. В связи с вышесказанным в 2013 г. в МАИ совместно с ОАО «КБХА» была начата разработка ВЧИД малой мощности (ВЧИД ММ).

В ходе разработки ВЧИД ММ выполнены расчетные исследования, позволившие оптимизировать конструктивные параметры эмиссионного и ускоряющего электродов двигателя.

Выполнены тепловой и термомеханический расчеты ВЧИД ММ, выявившие наиболее теплонапряженные элементы двигательного блока и позволившие принять меры к перераспределению тепловых потоков, а также выбрать материалы для изготовления электродов ионно-оптической системы (ИОС) двигателя.

Была создана и испытана лабораторная модель ВЧИД ММ. В ходе стендовых испытаний были продемонстрированы рабочие характеристики, близкие к расчетным. Были сделаны выводы о путях повышения основных рабочих характеристик двигателя.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель малой мощности (ВЧИД ММ), конструктивный облик, расчетные исследования, экспериментальная отработка, производственная база.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 378–385

LOW-POWER RADIO-FREQUENCY ION THRUSTER

R. V. Akhmetzhanov[1], A. V. Bogatyi[1], P. A. Dronov[2], G. A. Dyakonov[1*], A. V. Ivanov[2]

[1]Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics
of Moscow Aviation Institute (National Research University)
5, Leningradskoye shosse, Moscow, 125080, Russian Federation
[2]OSC “Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiky”
20, Voroshilova str., Voronezh, 394006, Russian Federation. [*]E-mail: riame3@sokol.ru

Development and application of small satellite (SS) is currently one of the dynamically developing fields of the world space industry. According to the analysis of current trends in the spacecraft market development, operation of a number of systems might be secured by a SS with the mass from 100 kg to 500 kg in low, up to 1000 km, orbits. There is an objective necessity in the means of orbit keeping and correction for SS of 100…500 kg in mass capable of securing obtaining of high-quality data during 5…10 years. For this, it is necessary to equip SS with the orbital motion control thrusters, and electric propulsions (EP) might be used as such. Typical active life of a SS with the mass of up to 500 kg that is not equipped with EP is limited by 2…3 years.

The Laboratory of Radio Frequency Ion Thrusters was founded within the Moscow Aviation Institute (MAI) in 2010. Vast experience in the investigation of radio frequency ion thrusters (RIT) characterized by different levels of power consumption has been accumulated since then. In view of this, in 2013 MAI jointly with KBKhA open joint-stock company started development of low-power RIT.

Computational studies that allowed optimization for the design parameters of emissive and accelerating electrodes of the thruster were made during the low-power RIT development.

Thermal and thermomechanical calculations were made for the low-power RIT also. Such calculations revealed the most heat-stressed elements of the thruster unit and allowed taking actions for redistribution of heat flows and selecting materials for the production of electrodes of the thruster ion-extraction system.

The low-power RIT laboratory model was made and tested. Operating performance close to the modeled ones were demonstrated by bench tests. Conclusions on the ways to increase basic operating performance of the thruster are made.

Keywords: low-power RF ion thruster, constructive shape, calculation research, experimental processing, industrial base.

Введение. В последние годы резко возросло количество выводимых на орбиту малых космических аппаратов. Стоимость МКА значительно ниже стоимости тяжелых аппаратов, что позволяет уменьшить потери при неудачном запуске или при досрочном выходе из строя в процессе эксплуатации [1]. Вследствие относительной простоты МКА существенно сокращаются также сроки их проектирования и изготовления. Анализ современных тенденций развития рынка КА показывает [2], что функционирование ряда систем могут обеспечивать МКА массой от 100 до 500 кг, размещенные на низких (до 1000 км) орбитах. К ним относятся системы мобильной связи и радионавигации, а также системы мониторинга Земли, атмосферы и околоземного космического пространства. Доля запускаемых тяжелых космических аппаратов (КА) (массой от 1 т и выше) постоянно снижается и сейчас составляет не более 30 % от общего количества запускаемых КА [3].

В последние годы существенно пересмотрены взгляды на области, в которых могут быть использованы МКА. Так, МКА все более широко используются для решения задач связи и телевещания, в том числе на геостационарных орбитах (ГСО). Согласно [2; 4] уже сейчас до 25 % геостационарных КА имеют массу менее 500 кг.

Для достижения окупаемости задач, решаемых МКА массой 150…600 кг, необходимо продление их срока активного существования (САС) до 5…10 лет [5]. Для этого необходимо оснастить МКА электрореактивными двигателями малой мощности (до 500 Вт). В качестве таких двигателей могут быть использованы ВЧИД мощностью 150…500 Вт.

Схема работы ВЧИД. Высокочастотный ионный двигатель работает следующим образом (рис. 1). Рабочий газ (ксенон) подается в газоразрядную камеру (ГРК). Высокочастотная (ВЧ) мощность в радиочастотном диапазоне подводится от ВЧ-генератора к индуктору. Зажигание разряда инициируется кратковременной подачей электронов, эмитируемых нейтрализатором в разрядную камеру. После зажигания в разрядной камере поддерживается ВЧ-разряд индуктивного типа. В разряде нагреваемые ВЧ электромагнитным полем электроны производят ионизацию рабочего тела. Ионы извлекаются из плазмы разряда и ускоряются в ИОС. На стационарном режиме работы нейтрализатор служит для инжекции электронов в пучок ускоренных ионов, что обеспечивает токовую нейтрализацию плазменной струи [6].

Конструктивная схема трехэлектродной ИОС, в которой реализуется схема «ускорение-торможение ионов», показана на рис. 2. Два электрода – эмиссионный (ЭЭ) и ускоряющий (УЭ) – выполнены перфорированными с множеством соосных отверстий. Третий замедляющий электрод (ЗЭ) чаще всего выполняется кольцевым, охватывающим пучок или может быть также перфорированным. Потенциал ЭЭ положителен, потенциал УЭ отрицателен по отношению к корпусу. ЗЭ заземлен или находится под потенциалом корпуса аппарата [7].

Ионы извлекаются из квазинейтральной плазмы газового разряда в ГРК через отверстия в эмиссионном электроде и ускоряются за счет потенциалов между ЭЭ и УЭ. Формирование пучка ионов определенной энергии, плотности тока и геометрии достигается согласованием параметров газоразрядной плазмы (концентрации плазмы и электронной температуры) с геометрическими параметрами ИОС (диаметрами отверстий, толщинами электродов и величинами межэлектродных зазоров), а также электрическими потенциалами ЭЭ и УЭ и атомной массой рабочего тела.

На выходе из двигателя ионный пучок в зоне нейтрализации трансформируется в поток квазинейтральной плазмы. Потенциал плазмы в зоне нейтрализации автоматически устанавливается таким образом, что формируется потенциальная ловушка для удержания в ее объеме электронов, компенсирующих пространственный заряд ионов [7].

Расчет основных характеристик ВЧИД. Основные рабочие характеристики ВЧИД – тяга P (Н), удельный импульс тяги $I_{уд}$ (с) и КПД η. Эти величины связаны между собой формулой

$$N = \frac{P \cdot I_{уд} \cdot g_0}{2\eta},$$

где N – полная потребляемая мощность двигателя; g_0 – ускорение свободного падения на уровне земли.

Тяга двигателя рассчитывается по формуле

$$P = \eta_\alpha \cdot i \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{M}{q} \cdot \left(U_+ + U_П\right)},$$

где η_α – КПД по расходимости, оценивающий потери в создании направленного импульса (тяги) из-за расходимости пучка; i – ток ионного пучка; q – заряд иона; M – масса атома рабочего тела (в данном случае используется ксенон); U_+ – потенциал ЭЭ относительно корпуса двигателя; $U_П$ – потенциал плазмы в ГРК относительно ЭЭ.

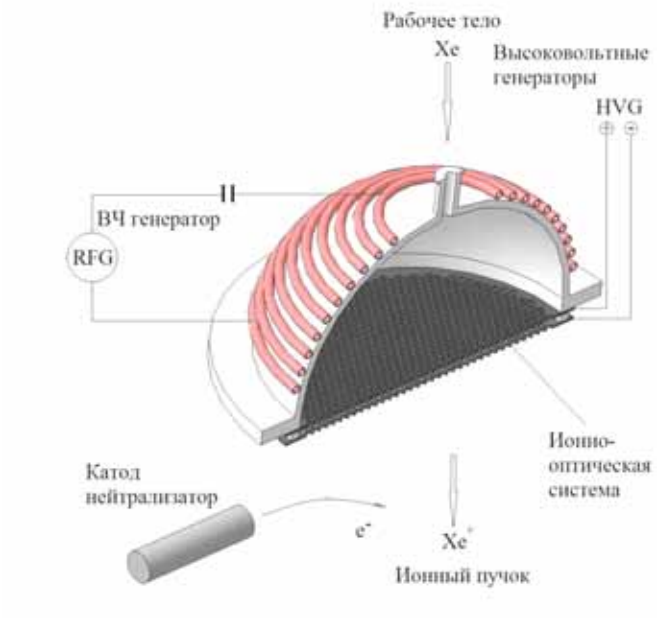


Рис. 1. Схема работы ВЧИД

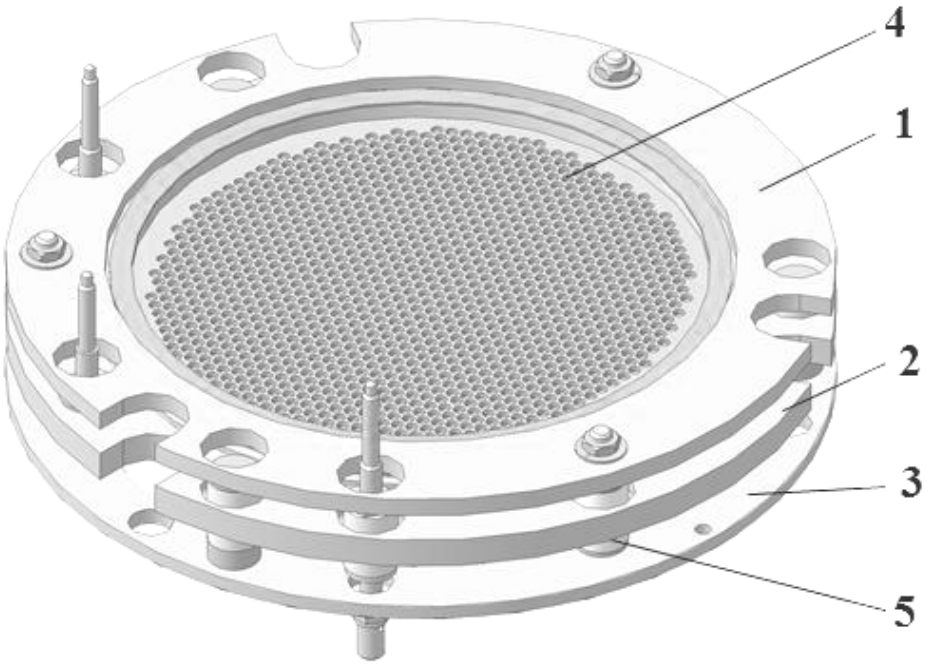


Рис. 2. Конструктивная схема ИОС:
1 – опорный фланец ЭЭ; *2* – опорный фланец УЭ;
3 – опорный фланец ЗЭ; *4* – эмиссионный электрод;
5 – стяжной узел

Удельный импульс тяги рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{уд}} = \frac{\eta_m}{g_0} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{q}{M} \cdot \left(U_+ + U_{\text{П}}\right)},$$

где η_m – коэффициент использования рабочего тела, равный коэффициенту ионизации ксенона в ГРК.

По этим формулам с учетом соображений о цене и коэффициенте ионизации, указанных в [8], были рассчитаны основные характеристики двигателя ВЧИД ММ для потребляемой мощности 300 Вт (табл. 1).

Базовым был выбран режим работы двигателя при ускоряющем напряжении 2000 В.

Расчет основных геометрических параметров ИОС. Рассматривается элементарное отверстие ИОС. Таких отверстий в ионно-оптической системе может быть от нескольких десятков до нескольких тысяч в зависимости от размера и требуемых характеристик двигателя. Два соседних отверстия показаны на рис. 3.

Таблица 1

Расчетные характеристики двигателя ВЧИД ММ

Ускоряющее напряжение, В	Тяга, мН	Удельный импульс тяги, с	КПД	Ток пучка, мА	Секундный расход рабочего тела, мг/с	Мощность, подаваемая от ВЧГ на индуктор, Вт
1000	10,6	2770	0,48	208	0,398	82
1500	9,6	3300	0,52	153	0,300	60
2000	8,8	3715	0,53	121	0,244	48
2500	8,1	4050	0,54	100	0,207	39

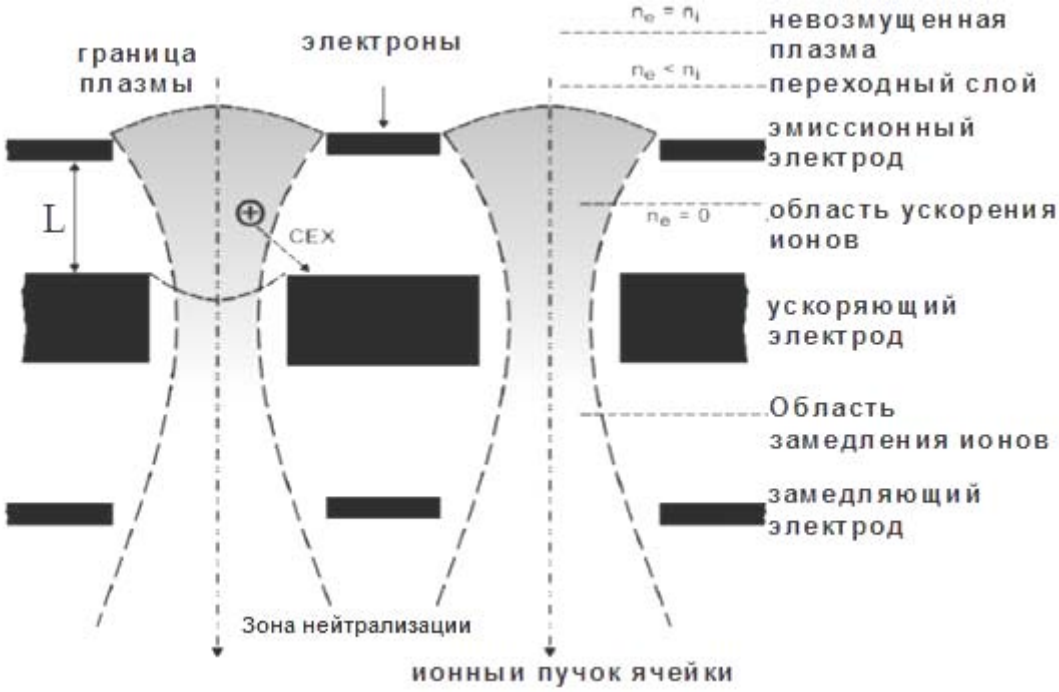


Рис. 3. Элементарные отверстия ИОС

Плотность тока ионного пучка через элементарное отверстие оценивается по формуле [9]

$$j_i \approx 0,43 e n_e \sqrt{\frac{2T_e}{M}} ,$$

где j_i – плотность ионного тока; e – элементарный заряд; n_e – концентрация электронов; T_e – температура электронов в ГРК; M – масса иона. Потенциал плазмы $U_п$ относительно ЭЭ оценивается по формуле [10]

$$U_П \approx -\frac{T_e}{e} \ln\left(0,86 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot m_e}{M}}\right),$$

где m_e – масса электрона.

Математическая модель первичного пучка описывается системой из трех уравнений [9].

1. Уравнение Пуассона, описывающее электрическое поле, создаваемое электродами с заданными потенциалами и объемным зарядом первичного пучка:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) = \frac{j_i}{\varepsilon_0 \sqrt{2e\varphi / M}} .$$

2. Уравнение движения положительно заряженных частиц в электростатическом поле:

$$M\frac{d\upsilon}{dt} = -e \cdot grad(\varphi) .$$

3. Условие неразрывности, которое говорит о том, что ионы первичного пучка в межэлектродном пространстве не могут ни родиться, ни исчезнуть:

$$div(e \cdot n_i \cdot \varphi) = 0 ,$$

где n_i – концентрация плазмы. На данную систему уравнений накладываются следующие граничные условия:

– потенциал электрода в каждой его точке одинаков, геометрия электродов сохраняется;

– на оси симметрии по направлению нормали к оси grad(φ) = 0 (условие Неймана);

– распределение потенциала в переходном слое [11];

– граница зоны нейтрализации первичного пучка ионов.

Данная задача решается в программном комплексе IGUN [12]. При моделировании потока ионов в IGUN входными данными являются геометрические параметры ИОС, потенциалы электродов, атомная масса рабочего вещества (в данном случае ксенона – 131,3 а.е.м.), температура электронов в ГРК. Также необходимо ввести либо плотность ионного тока через элементарное отверстие, либо концентрацию плазмы в ГРК. Геометрические параметры ИОС выбираются из следующих соображений:

– толщина эмиссионного электрода выбирается минимально возможной для снижения цены ионизации рабочего тела [8];

– межэлектродный зазор надо выбрать таким, чтобы не возникал пробой ионно-оптической системы. Его величина зависит от разности потенциалов между электродами и от материалов, из которых изготовлены электроды [13].

Температура электронов принята равной 5 эВ [8]. Потенциал ЭЭ был принят равным 2000 В. Потенциал УЭ отрицателен и по абсолютной величине он должен составлять 10–11 % от потенциала ЭЭ [8]. При моделировании в IGUN выходными данными являются ток пучка через элементарное отверстие, распределение объемного заряда, траектории ионов и полуугол расходимости ионного пучка.

Были проведены расчеты различных конфигураций ИОС и в итоге была выбрана ИОС с наименьшим полууглом расходимости (11º) и геометрическими параметрами, приведенными в табл. 2. При этом замедляющий электрод был выбран кольцевым.

При этих входных данных ток ионного пучка через элементарное отверстие составляет 0,389 мА. При полном токе ионного пучка 121 мА необходимо иметь в ИОС 313 элементарных отверстий. Пример расчета элементарного отверстия ИОС в программном комплексе IGUN показан на рис. 4.

Тепловое моделирование. В тепловом моделировании было принято, что теплообмен между элементами конструкции осуществляется либо излучением, либо теплопроводностью. Во всех стыковочных поверхностях предварительно рассчитываются термические контактные сопротивления в соответствии с коэффициентами теплопроводности и степенями шероховатости контактирующих поверхностей, а также давлением прижима [14].

Для решения задачи был применен метод дискретных элементов. Объект исследования разбивается на большое число малых элементов, внутри которых все физические характеристики, прежде всего температура, одинаковы. Точность метода определяется числом элементов разбиения N, что лимитируется производительностью применяемых вычислительных средств. Число элементов сетки разбиения составило около 70000.

В расчетной модели решается система линейных алгебраических уравнений относительно потоков Q_i лучистой энергии, идущих с каждого i-го поверхностного элемента [15]:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i}-F_{ji}\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right)\frac{1}{A_i}Q_i=\sum_{i=1}^{N}\left(\delta_{ji}-F_{ji}\right)\sigma T_i^4 ,$$

где ε_i – степени черноты поверхностей элементов; δ_{ji} – символ Кронекера; A_i – площади соответствующих элементов; σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Уравнение теплового баланса для i-го элемента сетки разбиения с учетом приходящей тепловой мощности из плазмы разряда в ГРК, лучистого и теплопроводного теплообмена между различными элементами сетки разбиения объекта ВЧИД можно представить в следующем виде:

$$q_i=\sum(q_{ji}^{Rad}+q_{ji}^{Cond})+w_j^{Plasma} ,$$

где q_i – плотность потока тепловой мощности, выходящей из i-го элемента сетки разбиения; q_{ji}^{Rad} – плотность совокупного поступающего на i-й элемент лучистого потока, суммируемого по всем элементам j; q_{ji}^{Cond} – плотность теплопроводного потока, поступающего на i-й элемент от j-элементов, соседних с i-м; w_j^{Plasma} – плотность соответствующего потока мощности, падающего из плазмы на i-й элемент.

Таблица 2

Геометрические параметры электродов ИОС ВЧИД ММ

Толщина ЭЭ, мм	Диаметр отверстий ЭЭ, мм	Межэлектродный зазор, мм	Толщина УЭ, мм	Диаметр отверстий УЭ, мм
0,3	2,5	0,8	1,5	1,7

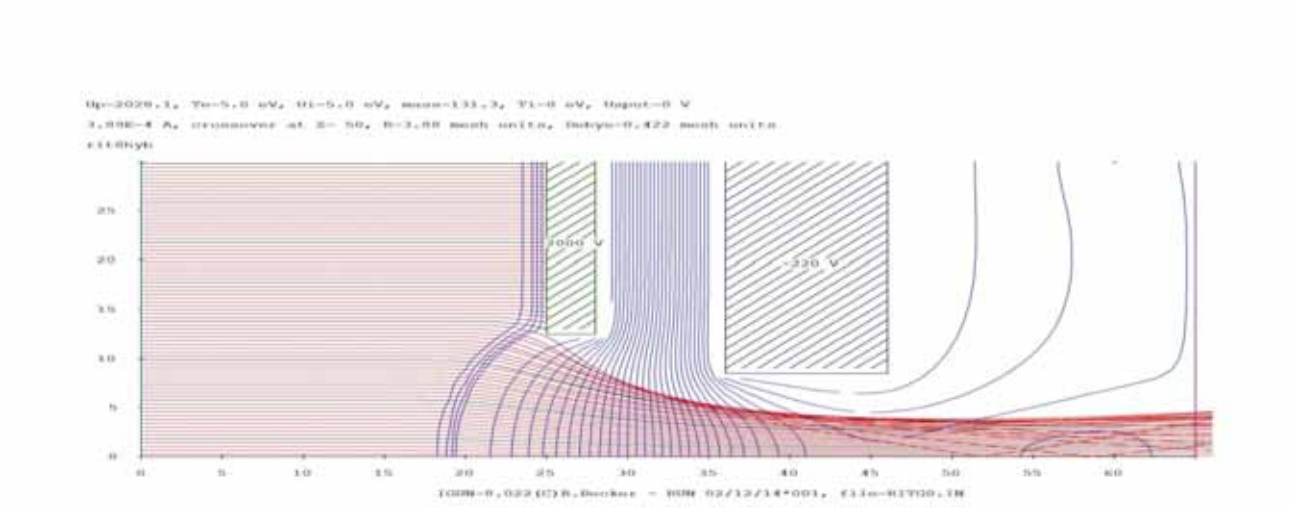


Рис. 4. Расчет элементарного отверстия ИОС в программном комплексе IGUN

Теплопроводный поток q_{ji}^{Cond} между элементами *i* и *j*, определяется с помощью конечно-разностного выражения обычного закона теплопроводности Фурье, где вместо градиента температуры используется разность температур соседних элементов, отнесенная к эффективному расстоянию между элементами.

Был проведен тепловой расчет для двух вариантов исполнения ИОС: с электродами, изготовленными из титана и из молибдена. ЭЭ из титана в центре нагревается до 345 °С и является самым нагретым элементом двигателя. Стоит отметить, что перепад температуры от центра к краю при исполнении ЭЭ из титана составляет около 100 °С, что может привести во время работы двигателя к деформации электрода. Молибденовый ЭЭ нагревается до 265 °С в центре, а перепад температур составляет 30 °С. Ускоряющие электроды из титана и молибдена нагреваются до 165 и 150 °С соответственно с перепадами температур в несколько градусов (рис. 5).

Из других элементов конструкции наиболее нагретым оказалась ГРК, нагретая до 240 ºС. Индуктор нагревается тепловым излучением от ГРК, его температура составляет 220 ºС.

Из элементов конструкции, с внешних поверхностей которых происходит основной сброс тепла в окружающее пространство из двигателя излучением, наиболее нагретой до 220 ºС является часть силового кольца, к которому крепятся ГРК и ЭЭ. Несмотря на малую толщину и плохую теплопроводность керамики стенок ГРК, силовое кольцо в этой части аккумулирует значительное количество тепла, «стекающего» к нему со стенок ГРК и ЭЭ.

Температуры посадочных поверхностей, где ионная часть ВЧИД механически сопрягается с другими элементами двигательной установки, составляют около 100 ºС и менее.

Термомеханическое моделирование. Как было показано при тепловом моделировании, электроды ИОС неравномерно нагреты по радиусу, что может вызвать термомеханические деформации, которые могут привести к расфокусировке пучка, а также к уменьшению зазора между электродами и межэлектродному пробою.

Полученные при тепловом моделировании исходные данные позволяют решить задачу о температурном выпучивании электродов ИОС в геометрически нелинейной постановке [16]. Это дает возможность определить критические значения радиального перепада температуры для идеально плоских электродов, а также рассмотреть их поведение после потери устойчивости. Кроме того, более обоснованно и результативно можно провести численное исследование нелинейного изгиба электродов на основе математического аппарата краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений [17].

Результаты термомеханического моделирования представлены в табл. 3, где ЭЭ-1 и УЭ-1 – эмиссионный и ускоряющий электроды, изготовленные из молибдена, а ЭЭ-2 и УЭ-2 – из титана.

Как видно из табл. 3, прогиб титанового ЭЭ составляет примерно 1 мм. Поэтому титановый ЭЭ не может использоваться в составе ИОС разрабатываемого ВЧИД. У молибденового ЭЭ прогиб приемлемый. Прогиб УЭ практически не влияет на фокусировку ионного пучка. По итогам термомеханического моделирования было принято решение выполнить ЭЭ из молибдена, а УЭ – из титана. Выбор материала УЭ связан с более низким коэффициентом ионного распыления титана по сравнению с молибденом [18].

Экспериментальная отработка. Лабораторный образец ВЧИД малой мощности был испытан на стендовой базе Московского авиационного института совместно с блоком системы питания и управления с высокочастотным генератором разработки УНПЦ «ФРЭЛА» МАИ. Двигатель работал при секундных расходах рабочего тела 0,29 и 0,22 мг/с. Результаты экспериментальной отработки представлены в табл. 4.

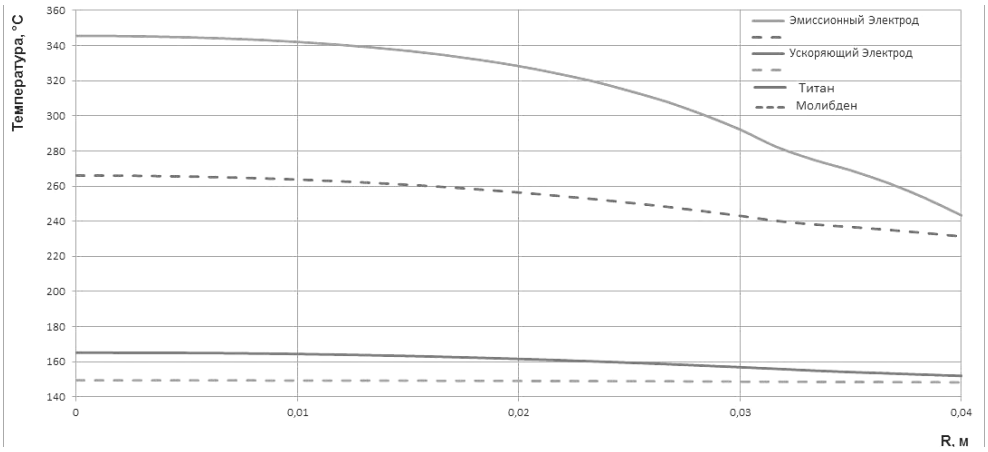


Рис. 5. Радиальные распределения температур ЭЭ и УЭ

Таблица 3

Прогибы электродов

Обозначение электрода	Толщина, мм	Диаметр отверстий, мм	Величина прогиба, мм
ЭЭ-1	0,3	2,5	0,1358
ЭЭ-2	0,3	2,5	0,9849
УЭ-1	1,5	1,7	0,0184
УЭ-2	1,5	1,7	0,0177

Таблица 4

Результаты экспериментальной отработки лабораторного образца ВЧИД ММ

№ эксперимента	Характеристика		
	1	2	3
ВЧ-мощность, Вт	53,1	53,6	61,4
Ток пучка, мА	110	110	110
Ускоряющее напряжение, В	2000	2000	2000
Секундный расход рабочего тела, мг/с	0,29	0,29	0,22
Коэффициент использования рабочего тела	0,520	0,520	0,685
Удельный импульс тяги, с	2865	2865	3775
Тяга, мН	8,1	8,1	8,1
Мощность двигателя, Вт	273,1	273,6	281,4
КПД двигателя	0,417	0,416	0,533
Цена ионизации рабочего тела, Вт/А	483	487	558

Как видно из табл. 4, характеристики двигателя несколько ниже рассчитанных. Это связано с неоптимальной конструкцией лабораторной модели. Достаточно высокая цена ионизации рабочего тела объясняется тем, что в лабораторной модели двигателя использовался ЭЭ толщиной 0,5 мм. При снижении толщины ЭЭ до 0,3 мм следует ожидать снижения цены ионизации.

Заключение. В Московском авиационном институте совместно с ОАО «КБХА» был разработан высокочастотный ионный двигатель малой мощности для управления орбитальным движением малых космических аппаратов.

Были рассчитаны основные рабочие характеристики двигателя и выбран основной режим работы. Был произведен расчет основных геометрических параметров ионно-оптической системы ВЧИД и выбрана конфигурация электродов ИОС, при которой достигается достаточно малый полуугол расходимости ионного пучка. В ходе теплового моделирования были определены температуры основных элементов конструкции двигателя на основном режиме работы. На основе теплового моделирования был произведен термомеханический расчет ионно-оптической системы, показавший, что в качестве материала для изготовления ЭЭ необходимо использовать молибден, так как при исполнении ЭЭ из титана при нагреве электрод сильно прогибается, что негативно сказывается на параметрах ионного пучка.

Был создан лабораторный образец ВЧИД ММ и проведена его экспериментальная отработка. На эксперименте были получены основные рабочие характеристики, близкие к расчетным. В настоящее время идут работы по оптимизации конструкции двигателя и улучшению его рабочих характеристик.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущей научной школы Российской Федерации НШ-895.2014.8 и гранта Правительства Российской Федерации № 11.G34.31.0022 для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования; при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств, выполняемых с участием высших учебных заведений по договору № 02.G25.31.0072; при государственной поддержке проведения прикладных научных исследований и разработок, направленных на создание продукции и технологий по соглашению № 14.577.21.0101.

Acknowledgments. This work was supported by the grant No. NSh-895.2014.8 of the Russian Federation President for the state support of the leading scientific schools of the Russian Federation; by the grant of the Russian Federation Government No. 11.G34.31.0022 for the state support of researches conducted under the supervision of the leading scientists at the Russian educational institutions of the higher professional education; with the Russian Federation Government (Russian Ministry of Education and Science) support for complex projects on creating high technology industries implemented with the participation of higher education establishments, agreement no. 02.G25.31.0072; with government support for applied research and development aimed at the creation of products and technologies under the Agreement № 14.577.21.0101, which are gratefully acknowledged.

Библиографические ссылки

1. Урличич Ю., Кузенков А. Спутниковая связь: состояние и перспективы // Аэрокосмический курьер. 2012. № 2. С. 52–53.

2. Звездин И. Малые космические аппараты: перспективы рынка // Взлет. 2005. № 1. С. 50–55.

3. da Cilva Curiel R. A. “SSHP-satellite classification” small satellites home page / Surrey Space Centre. Nov. 2000.

4. Dana Reizniece-Ozola. Business and legal aspects for small satellite control and payload data download using available commercial space-based communication systems // ISU EMBA 12 Module E – Thesis. 28 August. 2012.

5. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н. Н. Севастьянов [и др.] // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 14–22.

6. Loeb H. W. Development of RIT-Microthrusters. IAC-04-S.4.04. 55th IAC. Bremen, 2004.

7. Численное моделирование первичного пучка ионов и потока вторичных ионов в ионно-оптической системе ионного двигателя / В. К. Абгарян [и др.] // Труды МАИ : электронный журнал. 2013. № 71. URL: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46702 (дата обращения: 12.2.2015).

8. Loeb H. W. Principle of radio-frequency ion thrusters RIT. RIT-22 demonstrator test of Astrium ST at University of Giessen. 06–11 September. 2010.

9. Numerical Simulation of a High-Perveance Ion-Optycal System with a Plasma Emitter / V. K. Abgaryan [et al.] // X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques : Journal of surface investigation. 2013. Vol. 7, no. 6. P. 1092–1099.

10. Numerical Simulation of a System of Formation of an Intense Ion Beam From Gas Discharge Plasma of an Ion Thruster Presented at the 64th International Astranautical Congress / R. Akhmetzhanov [et al.] (Beijing, China, September 23–27, 2013). IAC-13-C4.4.11.

11. Обухов В. А., Сосновский В. Е. Расчет переходного слоя в эмиссионном отверстии газоразрядного источника ионов // 5 конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М. : Наука, 1982. С. 105–106.

12. Официальный сайт разработчика программного комплекса IGUN [Электронный ресурс]. URL: http://egun-igun.com (дата обращения: 3.2.2015).

13. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of electric propulsion. JPL Space science and technology series. March 2008. 493 p.

14. Radio Frequency Ion Beam Source : Pat. US5036252, Int. Cl. H 01 J 27/16 / Loeb H. Filed 1989.

15. Биргер И. А. Некоторые математические методы решения инженерных задач. М. : Оборонгиз, 1956. 150 с.

16. Биргер И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения. М. : Оборонгиз, 1961. 368 с.

17. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Н. Н. Безухов [и др.] ; под ред. И. И. Гольденблата. М. : Машиностроение, 1965. 567 с.

18. Зигмунд П. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / под ред. Р. М. Бериша М. : Мир, 1984. Т. 1. С. 23–98.

References

1. Urlichich Yu., Kuzenkov A. [Satellite communications: Status and Prospects]. *Aerokosmicheskiy kur'er*. 2012, No. 2. P. 52–53 (in Russ.).

2. Zvezdin I. [Small satellites: market prospects]. *Vzlet*. 2005, No. 1, P. 50–55 (In Russ.).

3. Da Cilva Curiel R. A. “SSHP-satellite classification” small satellites home page. Nov. 2000, Surrey Space Centre.

4. Dana Reizniece-Ozola. Business and legal aspects for small satellite control and payload data download using available commercial space-based communication systems. ISU EMBA 12 Module E–Thesis. 28 August 2012.

5. Sevastyanov N. N., Branets V. N., Panchenko V. A. et al. [Analysis of modern possibilities of creating small satellites for remote sensing of the Earth]. *Trudy MFTI*. 2009, Vol. 1, No. 3, P. 14–22 (In Russ.).

6. Loeb. H. W. Development of RIT-Microthrusters. IAC-04-S.4.04. 55th IAC, Bremen, 2004.

7. Abgaryan V. K., Akhmetzhanov R. V., Loeb H. W. et al. [Numerical Simulation of the Primary Ion Beam and of the Flow of Secondary Ions in the Grid System of an Ion Thruster]. *Trudy MAI*. 2013, No. 71 (In Russ.). Available at http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46702 (accessed 12.2.2015).

8. Loeb H. W. Principle of radio-frequency ion thrusters RIT. RIT-22 demonstrator test of Astrium ST at University of Giessen, 06-11 September, 2010.

9. Abgaryan V. K., Akhmetzhanov R. V., Loeb H. W. et al. Numerical Simulation of a High-Perveance Ion - Optycal System with a Plasma Emitter. *Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013, Vol. 7, No. 6, P. 1092–1099.

10. Akhmetzhanov R., Loeb H. W., Cherkasova M. V., Obukhov V. A. Numerical Simulation of a System of Formation of an Intense Ion Beam From Gas Discharge Plasma of an Ion Thruster Presented at the 64th International Astranautical Congress, Beijing, China, September 23–27, 2013, IAC-13-C4.4.11.

11. Obukhov V. A., Sosnovskiy V. Ye. [Calculation of the transition layer in the emission aperture of gas-discharge ion source]. *5-aya Konferentsiya po plazmennym uskoritelyam i ionnym inzhektoram.* [Materials of the 5th Conference on Plasma Accelerators and ion injectors], Moscow, Nauka Publ., 1982, P. 105–106 (In Russ.).

12. *Ofitsial'nyy sayt razrabotchika programmnogo kompleksa IGUN* [Official website of IGUN software developer]. Available at: http://egun-igun.com (accessed: 3.2.2015).

13. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of electric propulsion. JPL Space science and technology series, March 2008, 493 p.

14. Loeb H. Radio Frequency Ion Beam Source. Patent US5036252, Int. Cl. H01J 27/16, filed 1989.

15. Birger I. A. *Nekotorye matematicheskie metody resheniya inzhenernykh zadach* [Some mathematical methods of solving engineering problems]. Moscow, Oborongiz Publ., 1956, 150 p.

16. Birger I. A. *Kruglye plastinki i obolochki vrashcheniya* [Circular plates and rotating shells]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961, 368 p.

17. Bezukhov N. N., Bazhanov V. L., Goldenblat I. I. et al. *Raschety na prochnost', ustoychivost' i kolebaniya v usloviyakh vysokikh temperatur* [Calculations of strength, stability and vibration at high temperatures]. Edited by I. I. Goldenblat. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965, 567 p.

18. Zigmund P. *Raspylenie tverdykh tel ionnoy bombardirovkoy* [Sputtering of solids by ion bombardment]. Vol. I. Edited by P. M. Berish. Moscow, Mir Publ., 1984, P. 23–98.

© Ахметжанов Р. В., Богатый А. В., Дронов П. А., Дьяконов Г. А., Иванов А. В., 2015

УДК 629.7:532.59:539.3

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 386–394

ЗАТУХАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ГИДРОУДАРНЫХ ВОЛН В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРОТЯЖЁННЫХ ТРАКТОВ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. А. Барабанов [1], В. И. Бирюков [2*]

[1] ООО «Энергоавтоматика»
Российская Федерация, 127206, г. Москва, Чуксин тупик, 9
[2] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация,125993, г. Москва, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
[*]E-mail: aviatex@mail.ru

Волновые процессы в трубопроводных системах являются причиной неравномерности расходов подаваемых через них жидкостей. При открытии или закрытии регулирующей арматуры системы питания жидкостных ракетных двигателей возникают одиночные ударные волны, которые являются возмущениями давления в широком спектре частот и могут приводить к возбуждению неустойчивости рабочего процесса в газогенераторах или камерах сгорания. Целью работы является экспериментальное исследование процессов затухания вынужденных колебаний и одиночных гидроударных волн в турбулентных потоках слабосжимаемой капельной жидкости в гладких гидравлических магистралях круглого сечения. Поскольку процесс затухания ударных волн заметен только в протяженных трактах с отношением длины к диаметру трубопровода более нескольких тысяч, то методология проведения данной работы была построена на возбуждении гидроударных волн в магистральной транспортной системе, осуществляющей перекачку углеводородных горючих и регистрацию давления датчиками, расставленными равномерно вдоль магистрали. При исследованиях создавались возмущения с амплитудой более чем в 2 раза большей уровня постоянного гидродинамического шума. Одиночные гидроударные волны возбуждались путем проведения отбора жидкости. При этом в ответ на открытие крана (начало отбора) генерировалась волна разрежения, а на закрытие – волна сжатия. Проведённый спектральный анализ сигнала показал, что основная часть спектра гидродинамических колебаний находится в частотном диапазоне до 10 Гц. Более высокие частоты, генерируемые работой насосных агрегатов, быстро затухают. В результате экспериментов была получена аппроксимационная зависимость декремента затухания одиночных волн сжатия и разрежения в виде функции от чисел Рейнольдса. При переходных режимах течения жидкости от ламинарного к турбулентному динамические изменения происходят внутри ламинарного слоя и показатель затухания ударной волны стремится к постоянной величине. На основании сделанных предположений экспериментальные точки аппроксимированы экспоненциальной кривой вида $y = \eta_0 + A\left[1 - \exp\left(-Bx\right)\right]$. *По результатам проведенной обработки были получены значения для коэффициентов и выполнено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов. Показано удовлетворительное согласие результатов испытаний на модельной установке и на протяженных магистралях. Полученная экспериментальная зависимость, описывающая затухание гидроударных волн в турбулентных потоках, используется при проведении инженерных расчетов систем питания жидкостных ракетных двигателей на кафедре ракетных двигателей в Московском авиационном институте.*

Ключевые слова: гидроударная волна, спектр частот, декремент затухания, резонанс, турбулентность, число Рейнольдса.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 386–394

ATTENUATION OF THE COMPELLED FLUCTUATIONS AND HYDROSHOCK WAVES IN THE TURBULENT STREAM OF EXTENDED PATHS OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF LIQUID ROCKET ENGINES

S. A. Barabanov[1], V. I. Biryukov[2*]

[1] JSC “Power automatics”
9, Chuksin deadlock, Moscow, 127206, Russian Federation
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoe shosse, GSP-3, Moscow, 125993, Russian Federation
[*]E-mail: aviatex@mail.ru

Wave processes in pipeline systems are at the bottom of non-uniformity of the expenses submitted liquids through them. At opening or closing of regulating armature of a power supply system of liquid rocket engines there are single shock waves which are pressure indignations in a wide spectrum of frequencies and can lead to excitation of instability of working process in gas generators or combustion chambers. The work purpose is the experimental research of processes of attenuation of the compelled fluctuations and single hydroshock waves in turbulent streams poorly compressed a drop liquid in smooth hydraulic highways of round section. As process of attenuation of shock waves is swept up only in extended paths with the relation of length to diameter of the pipeline more than several thousand the methodology of carrying out of the given work has been constructed on excitation of hydroshock waves in the main transport system which is carrying out swapping hydrocarbonic combustible and registration of pressure by gauges, placed in regular intervals along a highway. At researches indignations with amplitude more than in 2 times of level of constant hydrodynamic noise were created. Single hydroshock waves were raised by carrying out the selection of liquid. Thus in reply to crane opening (the selection beginning) the wave pressure reduction, and on closing – a compression wave was generated. The carried out spectral analysis of a signal has shown that the basic part of a spectrum of hydrodynamic fluctuations is in a frequency range to 10 Hz. Higher frequencies generated by work of pump units, quickly fade. As a result of experiments approximation dependence of decrement of attenuation of single waves of compression and pressure reduction in the form of function from Reynolds's numbers has been received. At transitive modes of a current of a liquid from laminar to turbulent dynamic changes occur in a laminar layer and the indicator of attenuation of a shock wave aspires to a constant. On the basis of the made assumptions experimental points are approximated exponential by a kind curve $y = \eta_0 + A\left[1 - \exp\left(-Bx\right)\right]$. *By results of the spent processing values for factors have been received and comparison of the settlement data with results of experiments is executed. The satisfactory consent of results of tests to modeling installation and extended highways is shown. The received experimental dependence describing attenuation of hydroshock waves in turbulent streams, is used at carrying out of engineering calculations of power supply systems of liquid rocket engines on chair "Rocket engines" at the Moscow aviation institute.*

Keywords: a hydroshock wave, a spectrum of frequencies, decrement of attenuation, a resonance, turbulence, Reynolds's number.

Введение. Разработанные в 1980-х гг. маршевые жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) РД 170 и РД 171 для ракетоносителей (РН) «Энергия» и «Зенит» на компонентах керосин и жидкий кислород с высоким уровнем тяги (806,4 тс тяги в пустоте) характеризуются значительными расходом компонентов топлива (2393 кг/с) и высоким давлением в камерах сгорания (24,5 МПа). Неизбежное возбуждение ударных волн при открытии или закрытии отсечных клапанов во время проведения испытаний ЖРД сопряжено с повреждением измерительной и управляющей арматуры протяженных магистралей заправки. Одним из основных средств борьбы с гидроударными волнами является установка в магистралях демпферов и других устройств, снижающих энергию ударных возмущений [1–7]. Однако всегда остается открытым вопрос влияния волновых возмущений в магистралях на режим горения в камере ЖРД и, как следствие, возможное возбуждение неустойчивости горения [5; 8].

Из экспериментов на магистралях стендовой системы и теоретически определено, что в случае отсутствия потока ламинарная модель движения жидкости вполне удовлетворительно описывает акустические характеристики тракта в широком диапазоне частот вплоть до пятого резонанса продольных колебаний [1; 2; 9; 10]. Для трактов относительно малой длины (L/D < 200–300) эффектом затухания волновых возмущений при расчётах процессов, протекающих в них, можно пренебречь. Данных об экспериментальных исследованиях распространения волновых возмущений в протяженных трактах (где отношение диаметра к длине 1:1000 и более) в известных публикациях нет. В то же время влияние единичных гидроударных волн и волновых процессов на характеристики турбулентных течений в протяженных трактах являются важным аспектом при построении физико-математических моделей систем питания мощных жидкостных ракетных двигателей [1; 2; 6; 7; 11], а также при моделировании течений и режимов работы магистральных трубопроводов и других задач машиностроения.

Исследование затухания колебаний гидроакустической волны в протяжённых круглых трактах осложнено трудоёмкостью создания экспериментальной установки необходимого масштаба. Именно по этой причине отсутствуют экспериментальные работы, посвященные исследованию процессов затухания волновых возмущений при их распространении в трубах с большим соотношением длины к диаметру. Можно разработать физико-математическую модель распространения волн в турбулентном жидкостном потоке, основываясь на известных классических работах Н. Е. Жуковского [12], Г. Шлихтинга по теории пограничного слоя [13], И. А. Чарного по турбулентным течениям в трубах [14]. Данные для коэффициента трения при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости в гладких каналах можно получить из работ Блазиуса, Халанда, Свами [15] и др. Однако достоверность результатов численных расчетов может быть подтверждена только эмпирическим путем. Учитывая практическую направленность работы, целью настоящего исследования является создание инженерной методики расчета затухания ударных возмущений и вынужденных колебаний в жидкостных турбулентных потоках.

Квазистационарное решение. Определение параметров гидроударной волны и показателя её затухания

дал Н. Е. Жуковский в своей работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах» [12]. Аналитическое решение для коэффициента затухания волны в круглом тракте, полученное из предположения квазистационарности течения, было опубликовано в работе И. А. Чарного в 1975 г. Он, решая задачу распространения волны, использовал метод уравнений характеристик [14]. Представив уравнения для стационарного течения и возмущенного потока, он получил соотношение, связывающее изменение скорости u с пройденной волной расстояния x:

$$\frac{x}{4aD}=\int_{u_1}^{u}\frac{du}{\lambda_0 u_0\left|u_0-\lambda\right|-\lambda u\left|u\right|},\qquad(1)$$

где a – скорость звука в жидкости; D – внутренний диаметр круглого тракта; λ_0,λ – коэффициенты трения стационарного и возмущенного течения; u_1 – скорость распространения волны возмущения в сечении $x = 0$; u – скорость распространения волны возмущения при $x > 0$; u_0 – стационарная скорость течения до внесения возмущения в сечении x.

Коэффициент трения λ появляется при переходе от двумерного течения к одномерному, когда уже нельзя связать напряжения вязкого трения с изменением профиля скорости. В этом случае гидравлические потери давления из-за трения связывают с изменением скорости эмпирическими зависимостями типа уравнения Блазиуса. В то же время известно, что влияние сил трения жидкости о стенки гидравлического тракта зависит от частоты [12]. Используя безразмерные вариации скорости и давления в виде отношения возмущений скорости и давления $\delta u'$ и $\delta p'$ к их средним стационарным значениям $\delta u=\frac{\delta u'}{u_{\text{ср}}}$, $\delta p=\frac{\delta p'}{p_{\text{ср}}}$, а также безразмерных времени $\bar{t}=\frac{t}{(l/a)}$ и координаты $\bar{x}=\frac{x}{l}$, уравнения движения жидкости в малых отклонениях можно представить в виде

$$\begin{aligned}&\frac{\rho u a}{p_{\text{ср}}}\frac{\partial\delta u}{\partial\bar{t}}+\frac{\partial\delta p}{\partial\bar{x}}+\frac{\Delta p}{p_{\text{ср}}}\delta u=0;\\&\frac{\partial\delta p}{\partial\bar{t}}+\frac{\rho u a}{p_{\text{ср}}}\frac{\partial\delta u}{\partial\bar{x}}=0,\end{aligned}\qquad(2)$$

где Δp – гидравлические потери давления из-за вязкого трения в тракте.

В работе [2] рассмотрен пример распространения возмущений вдоль магистрали. Решая данное уравнение для гармонических колебаний частоты ω (безразмерный параметр частоты $\bar{\omega}=\frac{\omega l}{a}$):

$$\begin{aligned}&\delta p=\delta\tilde{p}_0 e^{i\bar{\omega}t};\\&\delta u=\delta\tilde{u}_0 e^{i\bar{\omega}t},\end{aligned}\qquad(3)$$

где $\delta\tilde{p}_0$ и $\delta\tilde{u}_0$ – амплитуды вынужденных колебаний давления и скорости, и получено решение в виде

$$\frac{d^2\delta\bar{u}}{d\bar{x}^2}+\left(\bar{\omega}^2-i\bar{\omega}\frac{\Delta p}{\rho u a}\right)\delta\bar{u}=0.\qquad(4)$$

Член в скобках формулы (4) является волновым числом $k^2=\bar{\omega}^2-i\bar{\omega}\frac{\Delta p}{\rho u a}$. При относительно малом гидравлическом сопротивлении и достаточно большой частоте выполняется условие $\bar{\omega}\frac{\Delta p}{\rho u a}\ll\bar{\omega}^2$, тогда при решении уравнения (4) вторым слагаемым в волновом числе k можно пренебречь. В полученном решении возмущения давления и скорости при их распространении вдоль тракта зависят от координаты и времени

$$\delta p=\frac{\rho u a}{\Delta p}\frac{k}{\bar{\omega}}\left[A\exp i\left(\bar{\omega}\bar{t}-k\bar{x}\right)-B\exp i\left(\bar{\omega}\bar{t}+k\bar{x}\right)\right].\qquad(5)$$

Уравнение (5) описывает распространение волн постоянной формы от источника в разные стороны трубы. Первое слагаемое в квадратных скобках описывает распространение возмущения в прямом направлении, а второе – в обратном. Постоянные A и B зависят от исходного сигнала возмущения. На практике мы чаще встречаемся с эффектом затухания возмущения, т. е. когда влиянием сил вязкого трения пренебрегать нельзя. В этом случае обе составляющие волнового числа являются соизмеримыми величинами, а решение уравнения (4) приобретает несколько другую форму, в которой появляется дополнительный множитель $\exp\left[-\operatorname{Im}(k)\bar{x}\right]$. Для гармонических колебаний, распространяющихся в прямом направлении, возмущения давления записываются следующим образом:

$$\delta p=A\exp i\left(\bar{\omega}\bar{t}-k\bar{x}\right)\exp\left[\operatorname{Im}\left(k\right)\bar{x}\right].\qquad(6)$$

Мнимая часть комплексного волнового числа является коэффициентом затухания $\operatorname{Im}\left(k\right)=\eta$. Значение коэффициента A получим из граничных условий при $x = 0$, так как в этом случае возмущения равны колебаниям, возбуждаемым источником: $A=\delta\tilde{p}_0$.

В экспериментах показатель (декремент) затухания определяем как величину, обратную расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в e раз:

$$\eta=\frac{1}{x}\ln\frac{\delta\tilde{p}_0}{\delta p}=\frac{1}{x}\ln\frac{\delta\tilde{u}_0}{\delta u}.\qquad(7)$$

Для гармонических колебаний в работе [2] аналитически было получено значение декремента затухания

$$\eta=\bar{\omega}\sqrt{\frac{1}{2}\left[\sqrt{1+4\left(\frac{\Delta p}{\rho u a}\right)^2}-1\right]}.\qquad(8)$$

Задачу определения коэффициента затухания для нестационарных течений в гидравлической магистрали можно решить аналитически лишь при специальных допущениях [14]. В общем случае необходимо выполнить точную математическую модель в частных производных и решить полученную систему уравнений численными методами.

В данной работе мы экспериментально исследовали затухание возмущений в узком диапазоне частот от 1 до 10 Гц и определяли зависимость коэффициента затухания от параметров течения в длинной магистрали.

Эксперимент. Волновые колебания в трубе – это распространяющиеся возмущения давления и скорости, которые связаны между собой известной формулой Н. Е. Жуковского. Поскольку измерение скорости потока технологически сложнее измерения давления, то в экспериментах регистрировались стационарные значения давления и пульсации давления равномерно расположенными вдоль трубы датчиками. При длинах трактов в несколько десятков километров, применительно к задачам транспортировки углеводородных топлив по магистральным трубопроводам, точки измерения контролируемых параметров устанавливались на расстоянии 10–20 км в зависимости от длины исследуемого трубопровода. Аналоговый сигнал датчика давления подавался на вход контроллера сбора, обработки информации и преобразовывался АЦП контроллера в цифровой сигнал. Оцифрованный сигнал фиксировался в оперативной памяти устройства, упаковывался и передавался на сервер базы данных, где были собраны в единую базу данных сигналы от всех точек измерений.

При анализе процессов распространения одиночной гидроударной волны в турбулентном потоке тракта мы столкнулись с задачей выделения полезного сигнала (волнового фронта) на фоне постоянного гидродинамического шума. Сам по себе гидродинамический шум представляет собой колебания различных частот, создаваемых работой насосных агрегатов и прочего технологического оборудования. Обрабатывая сигнал, в котором содержится только гидродинамический шум, можно наблюдать за процессами затухания волновых возмущений в широком спектре частот. В экспериментах инициировалась одиночная ударная волна с амплитудой более чем в 2 раза большей уровня постоянного гидродинамического шума. Гидроударные волны создавались путем отбора жидкости. При этом в ответ на открытие крана (начало отбора) генерировалась волна разрежения, а на закрытие – волна сжатия (рис. 1).

Эксперименты проводились на магистральных трубопроводах круглого сечения, осуществляющих постоянную перекачку углеводородных топлив. Физические характеристики перекачиваемой жидкости и параметры течения по каждому объекту представлены в таблице.

Проведённый спектральный анализ сигнала, измеренный преобразователем избыточного давления ТЖИУ 406, установленным на расстоянии $4\cdot10^4 D_у$, показал, что основная часть спектра гидродинамических колебаний находится в частотном диапазоне до 10 Гц (рис. 2). Высокие частоты, генерируемые работой насосных агрегатов, успевают затухать на расстоянии $4\cdot10^4 D_у$.

Измеряя амплитуду единичных гидроударных волн, а также и общий уровень гидродинамического шума, состоящего из колебаний частотой до 10 Гц, были получены идентичные картины затухания. Для каждого экспериментального образца протяженного тракта проводилась серия экспериментов по определению снижения пика давления волновых возмущений. Для этого строились кривые зависимости величины амплитуды гидроударной волны δp от расстояния (рис. 3).

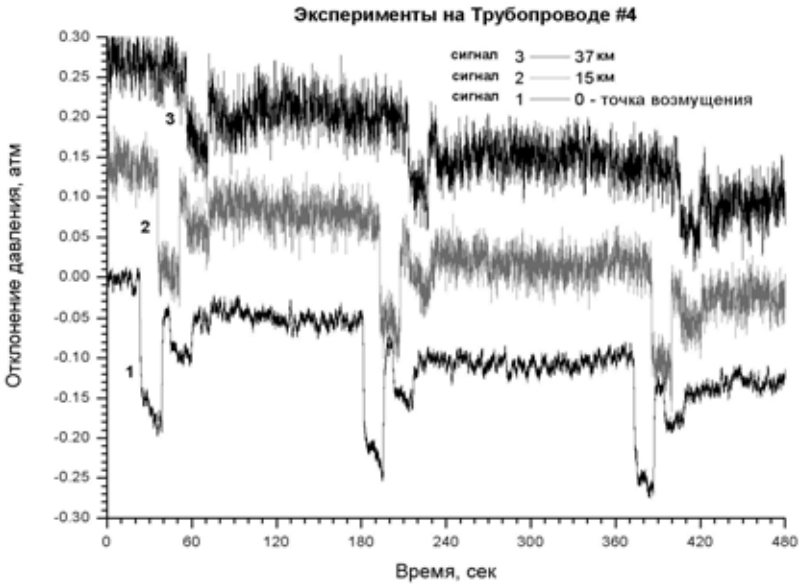


Рис. 1. Измеренные сигналы преобразователей давления, приведённые к отклонениям вблизи 0 вычитанием постоянной составляющей

Характеристики исследуемых объектов

№ п/п	Длина, км	Диа-метр, м	Плотность, кг/м^3	Эффективная вязкость, сСт	Скорость течения, м/с	Скорость звука, км/с	Число Рейнольдса (Re), 10^5
1	290	1	872,3	21	0,442	1,040	0,21
2.1	23	0,8	864,8	13,4	0,665	1,118	0,39
2.2					1,744	1,103	1,04
3	170	0,5	848	1	1,381	1,161	7,21
4	40	0,5	839,7	2	2,235	1,123	5,47
5	227	0,5	844	6	0,849	1,150	0,85
6	259	1	879	18	1,75	1,060	0,95

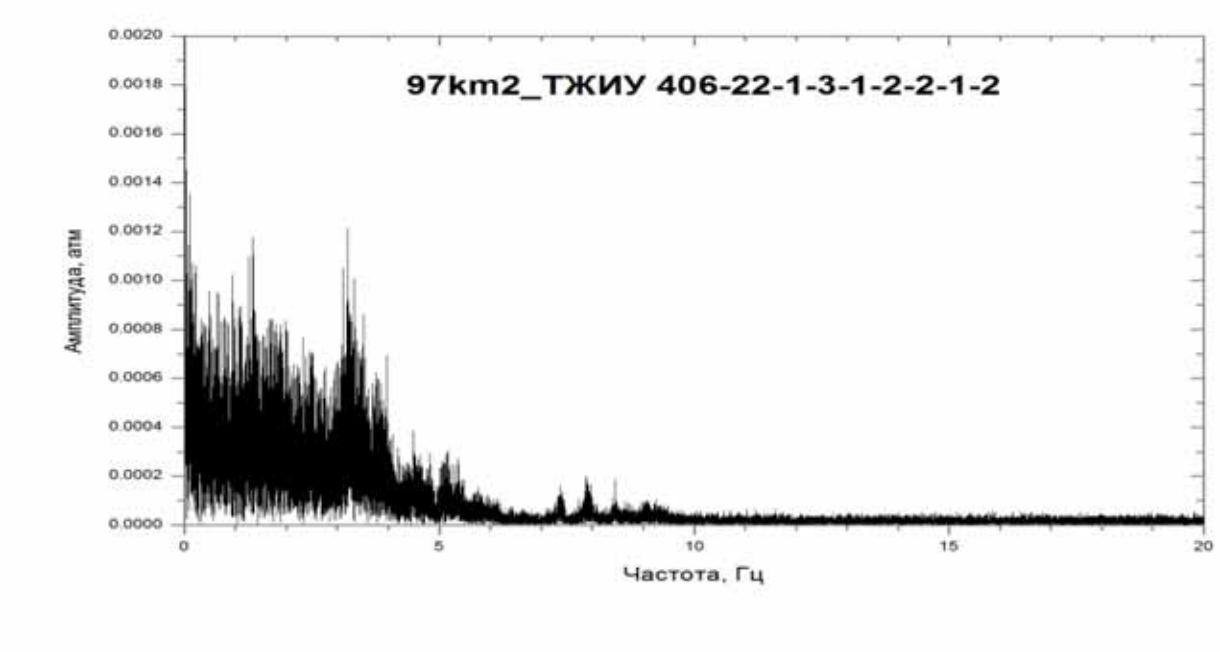


Рис. 2. Типичный спектр гидродинамического шума в тракте, записанный преобразователем

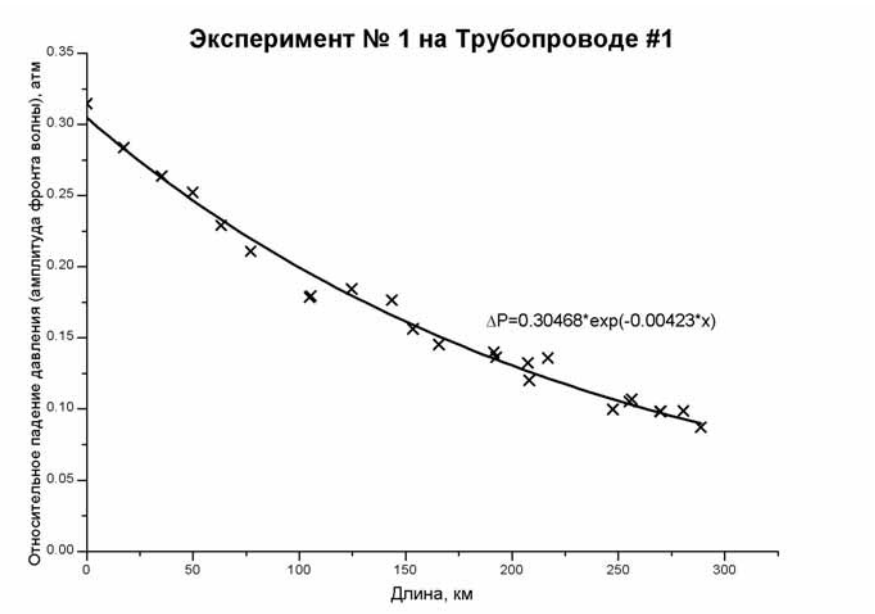


Рис. 3. Процесс затухания одиночной гидроударной волны

Следуя формуле (7), для каждого эксперимента набор точек был аппроксимирован при помощи стандартных функций математического программного обеспечения функцией вида $f(x) = A\exp(bx)$. Значения коэффициента b являются показателем (декрементом) затухания гидроударной волны. Очевидно, что затухание волновых процессов в турбулентном потоке происходит в основном благодаря силам вязкого трения. Отношение сил трения к силам инерции потока характеризуется числом Рейнольдса. В этой связи представляется целесообразным определять величину декремента затухания одиночной волны в зависимости от числа Рейнольдса:

$$\eta = f(\mathrm{Re}) = f\left(\frac{u_0 D_\text{у}}{\nu}\right), \tag{9}$$

где $D_\text{у} = \text{const}$ – внутренний диаметр исследуемого тракта; u_0 – скорость течения принималась постоянной и равной среднему значению скорости; ν – вязкость перекачиваемого продукта.

Вычислялась эффективная вязкость по формуле Блазиуса, исходя из уравнения потерь давления на трение на исследуемом участке на стационарном режиме, как

$$\Delta p = 0,3164\,\mathrm{Re}^{-\frac{1}{4}} \cdot \frac{l}{D_\text{у}} \frac{\rho u_0^2}{2}. \tag{10}$$

На основе обработанных данных всех экспериментов был построен график зависимости коэффициента затухания η от безразмерного параметра Re. Результаты каждой серии экспериментов были обобщены и получено одно среднее значение коэффициента затухания η для каждой серии. Полученные экспериментальные значения коэффициента затухания приведены на рис. 4.

При малых числах Рейнольдса Re << 10^5 течение в пограничном слое становится ламинарным [3] и функция затухания стремится к постоянной величине η_0, которая может быть вычислена при помощи формулы Стокса для закона трения. Постоянная величина коэффициента волнового затухания в ламинарном потоке равна

$$\eta_0 = \frac{16\nu}{D_\text{у}^2 a}. \tag{11}$$

При распространении возмущений в потоках при больших числах Рейнольдса динамические изменения происходят внутри ламинарного подслоя. Дальнейшее увеличение числа Рейнольдса не приводит к уменьшению ламинарного подслоя и, следовательно, не даёт изменений в коэффициенте затухания, и в результате он остаётся постоянным и стремится к постоянной величине. Таким образом, искомая функция имеет асимптоту $\eta = a$ при больших числах Рейнольдса. На основании сделанных предположений экспериментальные точки были аппроксимированы кривой вида

$$y = \eta_0 + A\left[1 - \exp(-Bx)\right].$$

По результатам проведенной обработки были получены следующие значения для коэффициентов: $A = 2 \cdot 10^5; B = 10^{-5}$.

Запишем полученную зависимость в следующем виде:

$$\eta = \eta_0 + \frac{1}{\beta}\left[1 - \exp\left(-\frac{\mathrm{Re}}{\mathrm{Re}_\text{кр}}\right)\right], \tag{12}$$

где $\beta = 47,32 \pm 0,32 = 47,3$ км – расстояние, на котором сигнал гидроударной волны затухает в e раз в турбулентном пограничном слое, а коэффициент β зависит от толщины ламинарного подслоя, который в свою очередь является функцией от шероховатости стенки магистрали; $\mathrm{Re}_\text{кр} = (0,897 \pm 0,022) \cdot 10^5 \sim 10^5$ – критическое значение числа Рейнольдса, при котором толщина ламинарного подслоя вблизи поверхности трубы становится менее 1 % от диаметра тракта, при этом дальнейший рост потерь из-за вязкого трения постепенно уменьшается, а коэффициент затухания выходит на постоянную величину $\frac{1}{\beta}$.

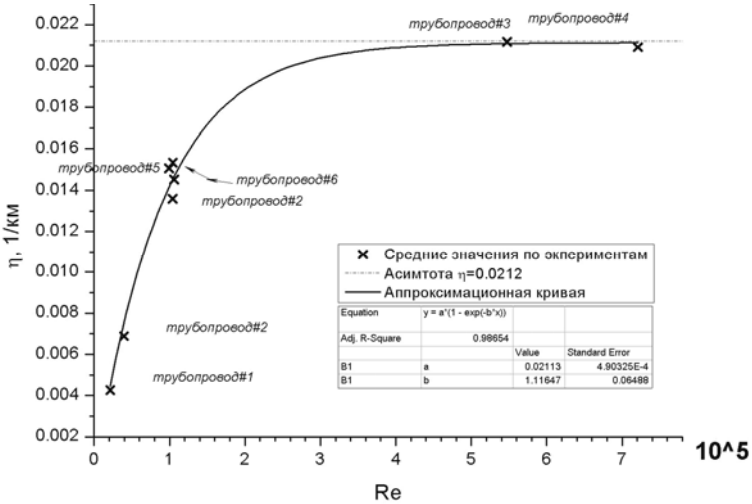


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания от безразмерного числа Рейнольдса

Предложенная эмпирическая зависимость позволяет проводить простую оценку затухания колебательных процессов и одиночных гидроударных волн, распространяющихся вдоль протяженного тракта круглого сечения.

Проведённые на следующем шаге исследования сравнения результатов полученной зависимости с теоретическими расчетами распространения возмущений, полученных вычислительными методами, показали, что наибольшая сходимость эксперимента и теории наблюдается в области малых значений числа Рейнольдса. В области больших значений Re результаты теоретических расчетов расходятся с экспериментом: затухание за счет вязкого трения в эксперименте больше рассчитанных значений.

Колебательный процесс состоит из «разгонных» волн сжатия и «тормозящих» волн разрежения. Проведенные серии экспериментов содержали исследования распространения и затуханиях волн обоих типов. Результаты экспериментов (рис. 5) подтвердили теоретические предположения, полученные У. Р. Лийвом в 1983 г. [15]: экспериментальные значения коэффициента затухания волны разрежения значительно меньше коэффициента затухания волны сжатия.

Например, для трубопровода № 3, результаты которого приведены на рис. 5, эта разница составила 0,009 1/км, т. е. затухание волн при торможении потока почти в 2 раза больше чем при разгоне.

На рис. 6, *а* приведено изображение распределения скорости потока по сечению магистрали в случае отсутствия волны давления. При распространении волны сжатия, т. е. при разгоне потока, профиль течения на фронте волны вытягивается (рис. 6, *б*).

В этом случае при $u_1 > u_0 > 0$ либо при $u_1 < u_0 < 0$ проинтегрированное уравнение (1) в предположении равенства значения $\lambda = \lambda_0 = \text{const}$:

$$\eta_2^{\text{р}} = \frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_{\text{у}}} + \frac{1}{x}\ln\left[1 + \frac{\Delta p_0}{2\rho c u_0}\left(1 - e^{\frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_{\text{у}}}x}\right)\right]. \qquad (13)$$

При торможении потока (рис. 6, *в*) при $u_1 > u_0 > 0$, а также и при $u_1 < u_0 < 0$, решение того же уравнения принимает вид

$$\eta_2^{\text{т}} = \frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_{\text{у}}} + \frac{1}{x}\ln\left[1 - \frac{\Delta p_0}{2\rho c u_0}\left(1 - e^{\frac{\lambda_0 |u_0|}{2aD_{\text{у}}}x}\right)\right]. \qquad (14)$$

Из сравнения полученных формул видно, что $\eta_2^{\text{т}} < \eta_2^{\text{р}}$, т. е. при одинаковых по модулю величинах скорости потока коэффициент затухания при разгоне потока будет больше, чем при торможении. При разгоне потока градиент скорости вблизи стенок трубопровода увеличивается, следовательно, потери на вязкое трение увеличиваются (рис. 6, *б*). При торможении потока профиль скорости становится таким, как изображенный на рис. 6, *в*, градиент скорости уменьшается, а с ним и потери на трение также уменьшаются.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований по затуханию ударных гидравлических волн на протяженных магистралях получены эмпирические соотношения показателя затухания в виде функциональной зависимости от критерия Рейнольдса.

Определено, что гармонические составляющие широкополостного спектра импульсного возмущения в турбулентном жидкостном потоке с частотой более 10 Гц при распространении в магистрали быстро затухают и несущественны. Увеличение показателя затухания низкочастотных составляющих спектра возмущения существенным образом определяется вязкостью и гидравлическими потерями и обратно пропорционально связано с волновыми свойствами среды и диаметром трубопровода. Найденные соотношения, описывающие затухание гидроударных волн в турбулентных потоках, используются при проведении инженерных расчетов систем питания жидкостных ракетных двигателей на кафедре ракетных двигателей в Московском авиационном институте.

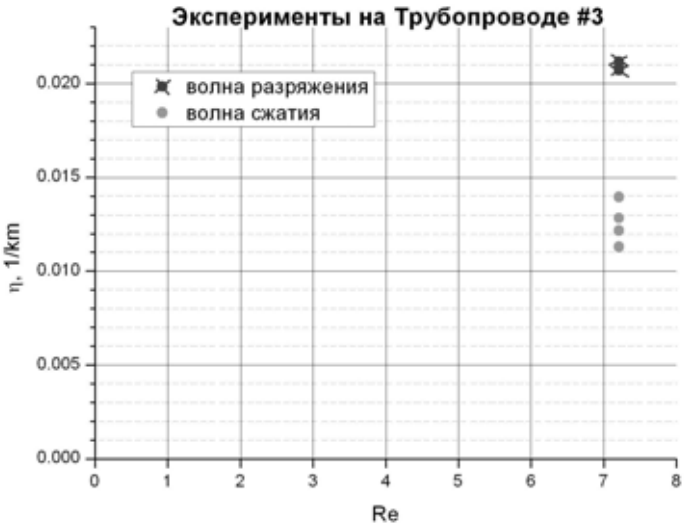


Рис. 5. Различие коэффициентов затухания гидроударной волны сжатия и разрежения

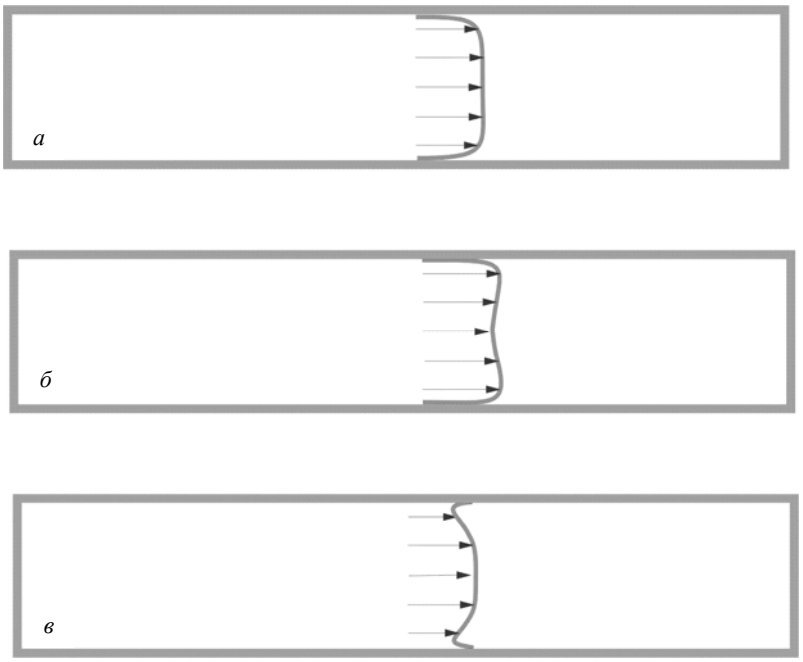


Рис. 6. Изменение профиля скорости на фронте волны

Полученные зависимости будут полезны для оценок воздействия гидроударных волн на агрегаты, арматуру и трубопроводы при проведении приемо-сдаточных испытаний (КТИ) и других видов испытаний жидкостных ракетных двигателей на предприятиях, занимающихся их разработкой и изготовлением.

Библиографические ссылки

1. Гликман Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 296 с.

2. Гликман Б. Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. М. : Машиностроение, 1979. 253 с.

3. Ламб Г. Гидродинамика. М. : Гостехиздат, 1947. 929 с.

4. Пухов В. А., Чучеров А. И. Стендовые огневые испытания ЖРД. М. : Машиностроение, 1971. 543 с.

5. Неустойчивость горения в ЖРД / под ред. Д. Т. Харрье, Ф. Г. Ирдона. М. : Мир, 1975. 870 с.

6. Махин В. А., Присняков В. Ф., Белик Н. П. Динамика жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 833 с.

7. Мошкин Е. К. Нестационарные режимы работы ЖРД. М. : Машиностроение, 1970. 336 с.

8. Бирюков В. И., Козлов А. А. Внутрикамерная низкочастотная неустойчивость рабочего процесса в дросселируемых ЖРД. М. : МАИ-ПРИНТ, 2007. 384 с.

9. Бирюков В. И., Мосолов С. В. Акустика газовых трактов жидкостных ракетных двигателей. М. : Изд-во МАИ, 2013. 164 с.

10. Экспериментальное исследование акустических характеристик столба жидкости в непроточных трубах / Е. Д. Барбашов [и др.] // Акустический журнал. 1996. Т. 42, № 4. С. 478–488.

11. Беляев Е. Н., Черваков В. В. Математическое моделирование ЖРД. М. : МАИ_ПРИНТ, 2009. 280 с.

12. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М. ; Л. : Гостехиздат, 1949. 103 с.

13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974. 713 с.

14. Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Недра, 1975. С. 186–191.

15. Лийв У. Р. Теоретические и экспериментальные основы расчета напорного ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах: автореф. дис. … д-ра техн. наук : 05.14.09. Л., 1983. 48 с.

References

1. Glikman B. F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Automatic control of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 296 p.

2. Glikman B. F. *Nestatsionarnye techeniya v pnevmogidravlicheskikh tsepyakh* [Non-stationary currents in pneumatichydraulic chains]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 253 p.

3. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1947, 929 p.

4. Pukhov V. A., Chucherov A. I. *Stendovye ognevye ispytaniya ZhRD* [Bench fire tests LPR]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 543 p.

5. *Neustoychivost' goreniya v ZhRD* [Liquid Propelland Rocket Combustion Instability]. Editor D. T. Xarrje, ass. edit. F. H. Reardon]. Moscow, Mir Publ., 1975, 870 p.

6. Makhin V. A., Prisnyakov V. F., Belik N. P. *Dinamika zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Dynamics of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 833 p.

7. Moshkin E. K. *Nestatsionarnye rezhimy raboty ZhRD* [Non-stationary operating modes LPR]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 336 p.

8. Biryukov V. I., Kozlov A. A. *Vnutrikamernaya nizkochastotnaya neustoychivost' rabochego protsessa v drosseliruemykh ZhRD* [Intrachamber low-frequency instability of working process in throttled LPR], Moscow, MAI-PRINT Publ., 2007, 384 p.

9. Biryukov V. I., Mosolov S. V. *Akustika gazovykh traktov zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Acoustics of gas paths of liquid rocket engines], Moscow, Izd-vo MAI Publ., 2013, 164 p.

10. Barbashov E. D., Glikman B. F., Kazakov A. A., Morozov S. A. [Experimental research of acoustic characteristics of a column of a liquid in landlocked pipes], *Akusticheskiy zhurnal*, 1996, Vol. 42, No.4, P. 478–488 (In Russ.).

11. Belyaev E. N., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* [Mathematical modeling LPR], Moscow, MAI_PRINT Publ., 2009, 280 p.

12. Zhukovskiy N. E. *O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh* [About hydraulic blow in water pipes]. M.–L., Gostekhizdat Publ., 1949, 103 p.

13. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [The interface theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 713 p.

14. Charnyy I. A. *Neustanovivsheesya dvizhenie real'noy zhidkosti v trubakh* [Unsteady movement of a real liquid in pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1975, P. 186–191.

15. Liyv U. R. *Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy rascheta napornogo uskorennogo dvizheniya zhidkosti v tsilindricheskikh trubakh. Avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk.* [Theoretical and experimental bases of calculation of the pressure head accelerated movement of a liquid in cylindrical pipes. Dr. techn. sci. diss. author's abstr.], Leningrad, 1983, 48 p. (In Russ.).

© Барабанов С. А., Бирюков В. И., 2015

УДК 621.396.67

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 395–399

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М. О. Дорофеев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: magsau@mail.ru

В настоящее время создание крупногабаритных антенных систем радиотехнических комплексов космических аппаратов является насущной потребностью в процессе освоения космоса. Крупногабаритные антенные системы обеспечивают прямой доступ персональных потребителей гражданских и военных ведомств к ресурсам космического аппарата, минуя наземных операторов. Крупногабаритные трансформируемые антенны (КТА) позволяют создать мощный энергетический потенциал радиолиний, существенно сократить размеры и стоимость абонентских терминалов. В области гражданского применения крупногабаритные трансформируемые рефлекторы обеспечат непосредственный доступ к рынку широкополосных мобильных услуг и создание космических систем персональной и мобильной связи. Учитывая высокие затраты на создание систем космической связи, возможно её двойное применение в интересах военных и гражданских потребителей. При использовании в составе космического аппарата КТА существует проблема поддержания требуемой геометрии конструкций антенны (рефлектора и облучателя). КТА нуждается в периодической корректировке ее геометрических параметров. Геометрическими параметрами являются положения систем координат конструкций антенны в некоторой базовой системе координат космического аппарата. Для проведения корректировки геометрических параметров с помощью управляющих органов необходимо их определять. Определение геометрических параметров антенны осуществляется за счет измерения координат контролируемых точек поверхности конструкций. Измерение координат контрольных точек осуществляется по светоотражающим элементам, расположенным на конструкциях антенны. В этой связи приведен состав системы контроля геометрических параметров КТА с кратким описанием составных частей и их основного назначения. Разработана методика определения пространственного положения недеформируемого объекта космического аппарата с помощью одного углоизмерительного прибора. В качестве недеформируемого объекта рассматривается облучатель крупногабаритной антенны. Методика основана на теореме косинусов и знании расстояний между контролируемыми точками объекта измерения. При описании методики рассматривалось минимальное количество светоотражающих элементов, равное трем. Для решения системы уравнений, описанной в алгоритме методики, применен метод Ньютона–Рафсона. Количество уравнений в системе определяется количеством светоотражающих элементов. Разработанная методика имеет достаточно простую математику и реализацию алгоритма. Представлено ее математическое описание и описаны результаты анализа погрешностей при вычислениях. Кроме того, описана применяемость разработанной методики и ее гибкость при изменении количества контролируемых точек.

Ключевые слова: определение пространственного положения объекта, бортовой комплекс контроля, крупногабаритная трансформируемая антенна, рефлектор антенны, методика определения положения.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 395–399

DEFINITIONING TECHNIQUE OF SPATIAL POSITION OF NON-DEFORMING CONSTRUCTION OF SPACECRAFT

M. O. Dorofeev

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: magsau@mail.ru

Currently, the creation of large antenna systems of radio engineering complexes of spacecraft is urgently needed in the process of space exploration. Large-size antenna systems provide direct access for personal consumers of civil and military departments to the resources of spacecraft, passing land operators. The large-size Transformed Antennas (LSTA) allow to create a powerful energy potential of radio lines, it is essential to reduce the sizes and costs of subscriber terminals. In the field of civil application the large-size transformed reflectors will provide direct access to the market of broadband mobile services and creation of space systems of personal and mobile communication. Considering high costs of creation of systems of space communication, its double application in interests of military and civil

consumers is possible. When using as a part of the spacecraft of the large LSTA there is a problem of maintenance of the demanded geometry of antenna constructions (a reflector and an irradiator). LSTA needs in periodic adjustment of its geometrical parameters. Geometrical parameters are positions of coordinate system of antenna constructions in some basic coordinate system of spacecraft. For carrying out adjustment of geometrical parameters it is necessary to define them by the operating organs. Determination of geometrical parameters of the antenna is carried out due to measurement of coordinates controlled points of a construction surface. Measurement of coordinates of control points is carried out on reflecting elements, located on antenna designs. In this regard the structure of monitoring systems of geometrical parameters LSTA with the short description of components and their basic purpose is given. The technique of definition of spatial position of non-deforming object on the spacecraft by means of one device measuring rotary is developed. As non-deforming object the irradiator of large-size antenna is considered. The technique is based on the theorem of cosines and knowledge of distances between controlled points of object measurement. At the description of a technique the minimum quantity of reflecting elements equal was considered we rub. Newton-Rafson's method is applied to the decision of the system of the equations given in algorithm of a technique. The quantity of the equations in system is defined by quantity of reflecting elements. The developed technique has rather simple mathematics and realization of algorithm. A mathematical description is presented and the results of the analysis of errors in calculations are described. Besides, applicability of the developed technique and its flexibility are described at change quantity of controllable points.

Keywords: definition of spatial provision of object, onboard complex of control, large-size transformed antenna, reflector of antenna, position definition technique.

Введение. При использовании в составе космического аппарата крупногабаритных трансформируемых антенн (КТА) – рефлектора и облучателя, для обеспечения заданной точности наведения главного луча и формирования требуемой диаграммы направленности антенны, необходимо использовать периодическую корректировку положения рефлектора в условиях эксплуатации на орбите. В результате деформаций и смещений рефлектора, а также смещений облучателя КТА изменяются их положения в некоторой заданной системе координат (СК). Смещение рефлектора и облучателя относительно положения, заданного конструкторской документацией, влечет ухудшение радиотехнических характеристик антенны. Искажение формы и положения поверхности рефлектора, а также смещение при раскрытии облучателя КТА является результатом различных погрешностей взаимного расположения (погрешности, связанные температурными деформациями конструкции рефлектора; погрешности, связанные с деградацией материалов; погрешности, вызванные ошибками раскрытия конструкций КТА; погрешности изготовления конструкций и др.). Влияние на качество радиотехнических характеристик КТА оказывает результат взаимного расположения облучателя и рефлектора после их раскрытия в начальных режимах космического аппарата, что связано с разделенной наземной экспериментальной отработкой штанги, облучателя и рефлектора КТА [1–4].

Для выполнения задач корректировки положения рефлектора КТА необходимо с высокой точностью определить геометрические параметры взаимного расположения рефлектора и облучателя. Геометрическими параметрами являются расстояние между фокусом рефлектора и фазовым центром облучателя, а также ориентация фокальной оси рефлектора. Для определения геометрических параметров КТА необходимо определять пространственное положение ее рефлектора и облучателя. Для выполнения задачи определения положения конструкций КТА космический аппарат, имеющий в своем составе подобные антенные системы, необходимо оснащать системой контроля геометрических параметров (СКГП) КТА [5–7].

Состав СКГП и назначение ее элементов. В состав СКГП должны входить следующие элементы [8]:

– лазерный сканер;
– углоизмерительный прибор;
– светоотражательные элементы (СЭ);
– программное обеспечение.

Лазерный сканер определяет и выдает в бортовой вычислительный комплекс информацию о сферических координатах (расстояние и углы направления) СЭ, находящихся в его зоне действия, в системе координат, связанной с посадочной плоскостью прибора [9].

Углоизмерительный прибор (УП) предназначен для определения и выдачи в бортовой вычислительный комплекс информации об углах направления на СЭ, находящихся в его поле зрения, в СК, связанной с посадочной плоскостью прибора.

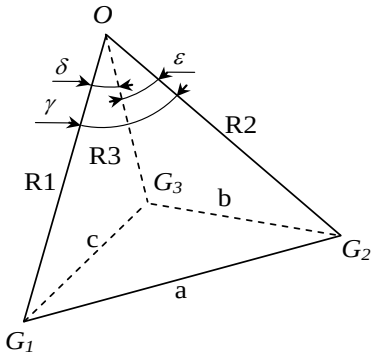
СЭ отражает падающее на него излучение в обратном направлении. По измеренным сферическим координатам СЭ вычисляются декартовые координаты контролируемых точек поверхности рефлектора и облучателя КТА.

Программное обеспечение СКГП выполняет следующие задачи: организация режимов работы системы и считывания информации с включенной бортовой аппаратуры, формирование команд для организации режимов и перехода между ними, вычисление пространственных координат КТ поверхностей рефлектора и облучателя КТА по измерениям СКГП, вычисление геометрических параметров КТА, формирование программной телеметрической информации, диагностика СКГП и ее оборудования и др.

На основе измерений БА вычисляются пространственные координаты контролируемых точек поверхностей конструкций КТА. Затем по вычисленным координатам этих точек определяется положение СК рефлектора и СК облучателя в некоторой базовой СК, позволяя затем определить геометрические параметры КТА. Ниже будет представлена методика определения положения недеформируемой конструкции КТА. Недеформируемой конструкцией считается любая конструкция, поверхность которой в процессе эксплуатации не подвержена искажению и принадлежащие ей точки не изменяют своего положения

(в пределах заданного допуска) относительно начального. В данном случае недеформируемой конструкцией считается облучатель КТА. СК облучателя определяется по вычисленному массиву пространственных координат СЭ, расположенных на его корпусе, с помощью измерений одного УП и знания расстояний между измеряемыми СЭ.

Описание методики определения положения недеформируемой конструкции. Рассмотрим данный алгоритм на примере трех СЭ. В трех вершинах *G*1, *G*2 и *G*3 пирамиды, представленной на рисунке, расположены СЭ. Вершина пирамиды (*O*) является центром СК УП. Стороны пирамиды, находящиеся между центром СК УП и соответствующими СЭ, являются ребрами пирамиды и, соответственно, искомыми расстояниями. Эти расстояния необходимы для определения пространственных координат СЭ в СК УП. Найденные пространственные координаты СЭ в СК УП однозначно можно пересчитать в базовую СК, зная положение СК УП в базовой СК [10].



Геометрическое представление задачи

Совокупность каждой пары ребер и стороны основания пирамиды образуют треугольник. По теореме косинусов в трех треугольниках, которые являются гранями пирамиды, существуют уравнения связи (1) между их сторонами:

$$\begin{aligned} a^2 &= R_1^2 + R_2^2 - 2\cdot R_1\cdot R_2\cdot\cos(\gamma),\\ b^2 &= R_2^2 + R_3^2 - 2\cdot R_2\cdot R_3\cdot\cos(\varepsilon),\\ c^2 &= R_1^2 + R_3^2 - 2\cdot R_1\cdot R_3\cdot\cos(\delta), \end{aligned} \tag{1}$$

где *a*, *b*, *c* – стороны треугольников, образованных СЭ, соответствующие сторонам G_1G_2, G_2G_3, G_1G_3; R_1, R_2, R_3 – расстояния от центра СК УП до соответствующих СЭ; γ, ε, δ – углы в треугольниках G_1OG_2, G_2OG_3, G_1OG_3, противолежащие соответствующим сторонам *a*, *b*, *c*.

На основе уравнений связи (1) получается система из трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными расстояниями до СЭ. Для решения этой системы уравнений необходимы величины расстояний *a*, *b*, *c* между СЭ, а также три косинуса углов при вершине *O* треугольников, образованных каждой парой из трех СЭ и центром СК УП [11].

Найденные косинусы углов и расстояния между СЭ подставляются в качестве исходных данных в систему нелинейных уравнений. Данная система уравнений решается численным методом, в данном случае методом Ньютона–Рафсона, который позволяет получать решения с любой степенью точности. Результатом решения данной системы уравнений являлись расстояния от СК УП до СЭ [12] .

После определения искомых расстояний до соответствующих СЭ необходимо определить их декартовы координаты в СК УП, используя преобразования (2):

$$\begin{aligned} x_i &= R_i\cos\alpha_i\cos\beta_i\\ y_i &= R_i\cos\alpha_i\sin\beta_i\,,\\ z_i &= R_i\sin\alpha_i \end{aligned} \tag{2}$$

где α_i, β_i – угол места и азимут направления на *i*-й СЭ в СК УП; R_i – расстояние от центра СК УП до *i*-го СЭ; x_i, y_i, z_i – пространственные координаты *i*-го СЭ.

Если привязать к группе СЭ некоторую СК, то, вычислив декартовы координаты этих СЭ, можно однозначно определить линейное положение СК группы СЭ относительно СК УП. Для того, чтобы определить угловое положение СК группы СЭ относительно СК УП, необходимо определить матрицу направляющих косинусов ее осей.

Для определения матрицы направляющих косинусов необходимы следующие исходные данные:

– $M_{\text{ТКЭ}}$ – массив теоретических декартовых координат СЭ, который состоит из пространственных координат в несмещенной (заранее определенной) СК группы СЭ относительно СК УП и имеет вид, представленный в (3);

– $M_{\text{ИКЭ}}$ – массив измеренных декартовых координат СЭ, который определяется вычисленными по измерениям УП координатами в смещенной СК группы СЭ относительно СК УП и имеет вид, представленный в (4):

$$M_{\text{ТКЭ}} = \begin{vmatrix} x_{\text{Т}_1} & y_{\text{Т}_1} & z_{\text{Т}_1}\\ \dots & \dots & \dots\\ x_{\text{Т}_i} & y_{\text{Т}_i} & z_{\text{Т}_i} \end{vmatrix}, \tag{3}$$

$$M_{\text{ИКЭ}} = \begin{vmatrix} x_{\text{И}_1} & y_{\text{И}_1} & z_{\text{И}_1}\\ \dots & \dots & \dots\\ x_{\text{И}_i} & y_{\text{И}_i} & z_{\text{И}_i} \end{vmatrix}, \tag{4}$$

где $x_{\text{Т}_i}$, $y_{\text{Т}_i}$, $z_{\text{Т}_i}$ – теоретические пространственные координаты *i*-го СЭ в СК УП; $x_{\text{И}_i}$, $y_{\text{И}_i}$, $z_{\text{И}_i}$ – измеренные пространственные координаты *i*-го СЭ в СК УП.

Используя данные массивы декартовых координат, однозначно вычисляется матрица направляющих косинусов, имеющая следующий вид:

$$MNK = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Угловое положение можно описать либо через последовательные повороты трёх углов Эйлера–Крылова, либо через кватернионы. Углы Эйлера–Крылова или кватернионы можно определить, используя найденные элементы матрицы направляющих косинусов (5) и выражения элементов одной из матриц (6), тем самым определяя угловое положение СК группы СЭ в СК УП. Выражения элементов матриц $T_{\psi\varphi\theta}$ и T_Q соответствуют элементам матрицы *MNK*:

$$T_{\psi\varphi\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi)\cos(\theta) & \cos(\varphi)\sin(\theta) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\psi)\sin(\varphi)\cos(\theta) - \cos(\psi)\sin(\theta) & \sin(\psi)\sin(\varphi)\sin(\theta) + \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\psi)\cos(\varphi) \\ \cos(\psi)\sin(\varphi)\cos(\theta) + \sin(\psi)\sin(\theta) & \cos(\psi)\sin(\varphi)\sin(\theta) - \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\varphi) \end{bmatrix},$$

$$T_Q = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_3q_0) & 2(q_1q_3 - q_2q_0) \\ 2(q_2q_1 + q_3q_0) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_1q_0) \\ 2(q_3q_1 - q_2q_0) & 2(q_3q_2 + q_1q_0) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $T_{\psi\varphi\theta}$, T_Q – представление матрицы направляющих косинусов (5) в углах Эйлера–Крылова и кватернионах; ψ, φ, θ – углы Эйлера-Крылова; q_0, q_1, q_2, q_3 – кватернионы.

Для определения углов Эйлера–Крылова (ψ, φ, θ) или кватернионов (q_0, q_1, q_2, q_3) необходимо использовать выражения (7) и (8).

$$\psi = \mathrm{arctg}\left(\frac{T_{\psi\varphi\theta}[2,3]}{T_{\psi\varphi\theta}[3,3]}\right);$$
$$\varphi = \arcsin(-T_{\psi\varphi\theta}[1,3]); \quad (7)$$
$$\theta = \mathrm{arctg}\left(\frac{T_{\psi\varphi\theta}[1,2]}{T_{\psi\varphi\theta}[1,1]}\right);$$

$$\delta = \arccos(0,5\cdot(T_Q[1,1] + T_Q[2,2] + T_Q[3,3] - 1));$$
$$q_0 = \cos(\delta); \quad q_1 = \frac{T_Q[2,3] - T_Q[3,2]}{4\cdot q_0}; \quad (8)$$
$$q_2 = \frac{T_Q[3,1] - T_Q[1,3]}{4\cdot q_0}; \quad q_3 = \frac{T_Q[1,2] - T_Q[2,1]}{4\cdot q_0}.$$

Для оценки конечной погрешности вычислений при использовании разработанной методики было проведено математическое моделирование процесса измерений СЭ, расположенных на поверхности контролируемого объекта. Математическое моделирование выполнялось в программной среде Matlab 7 [13–15].

Оценка методики определения положения СК недеформируемого объекта проводилась при наложении максимальных погрешностей измерения в 10" для плоского объекта с габаритами 50×50 м, при расположении на нем 13 СЭ на расстоянии 30 м относительно УП. Расстояния до СЭ находятся в диапазоне от 30 до 50 м. При оценке максимальных погрешностей данной методики было выявлено, что при использовании вычисленных координат с применением одного УП погрешности определения углового положения составляют порядка 1', а линейного – 5 мм.

На конструкции можно расположить любое необходимое количество СЭ, так как используемая система уравнений масштабируема, т. е. добавление СЭ приводит к увеличению количества уравнений. Каждое уравнение в системе (1) имеет связь между двумя элементами (расстояния до СЭ), при этом связи элементов не должны повторяться в уравнениях. Количество связей элементов рассчитывается с помощью факториалов. С учетом вышеописанного была получена зависимость количества уравнений от количества СЭ, которая определяется выражением (9):

$$C = \frac{n!}{2\cdot(n-2)!}, \quad (9)$$

где C – количество уравнений; n – количество СЭ.

Заключение. Разработанный алгоритм позволяет определять линейное и угловое положение любых недеформируемых конструкций, используя только один УП, и может быть реализован на борту космического аппарата. В некоторых случаях, когда требования к точности определения положения достаточно грубые и существует возможность использования высокоточного оборудования для измерения углов, но при этом поверхность объекта имеет деформации в некотором известном диапазоне, то данная методика может быть применена после предварительной оценки максимальных погрешностей ее работоспособности.

Библиографические ссылки

1. Отдел СМ1-1. Крупногабаритные космические конструкции [Электронный ресурс]. URL: http://niism.bmstu.ru/otdelyi-nii-sm/sm1-1 (дата обращения: 08.04.2015).
2. Крупногабаритный космический складной рефлектор: пат. 2101811 Российская Федерация / Заболотский Л. В. Заявл. 07.16.97 ; опубл. 10.01.98.
3. Моделирование систем гравитационного уравновешивания крупногабаритных трансформируемых конструкций космической техники [Электронный ресурс]. URL: http://cosmos.basnet.by/uiip_114.html (дата обращения: 11.04.2015).
4. Усманов Д. Б. Моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритного трансформируемого рефлектора : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.04. Томск : Томский государственный университет, 2006. 179 с. РГБ ОД, 61:07-1/254.
5. Кирчин Ю. Г. Разработка и исследование оптико-электронных систем для контроля смещений : дис. … канд. техн. наук. : 05.11.07. СПб. : СПбГИТМО, 1993. 193 с.
6. ThreeDimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays / Albota Marius A. [et al.] // Lincoln Laboratory Journal. 2002. Vol. 13, No. 2, P. 351–370.
7. Формирование светового шаблона крупногабаритных объектов методами дифракционной оптики [Электронный ресурс]. URL: http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO37-4/370403.pdf (дата обращения: 03.04.2015).
8. Выбор приборного состава системы определения геометрии крупногабаритной трансформируемой антенны / М. О. Дорофеев [и др.] // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. (10–12

нояб. 2011, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 98–99.

9. Демкин В. Н. Лазерные методы и средства измерения геометрии поверхностей сложной формы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.07. М. : НИИ «Полюс», 2004. 247 с. РГБ ОД, 71:05-5/581.

10. Дорофеев М. О., Бикеев Е. В. Методики определения взаимного положения двух объектов // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем : материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», посвященной 50-летию полета в космос Ю. А. Гагарина / под общ. ред. Н. А. Тестоедова. Железногорск, 2011. С. 233–234.

11. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии. М. : Наука, 1968. С. 176.

12. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве : пер. с англ. М. : Мир, 1982. 304 с.

13. Золотых Н. Ю. Использование пакета Matlab в научной и учебной работе : учеб.-метод. материалы по программе повышения квалификации // Информационные технологии и компьютерная математика. Нижний Новгород, 2006. 165 с.

14. Зарубин В. С., Крищенко А. П. Математическое моделирование в технике : учебник для вузов // Математика в техническом университете. Вып. XXI, заключительный. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 496 с.

15. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование : учеб. пособие. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 280 с.

References

1. *Otdel SM1-1 Krupnogabaritnye kosmicheskie konstruktsii* [Department of SM1-1 the large-size space designs]. Available at: http://niism.bmstu.ru/ otdelyi-niism/sm1-1 (accessed 08.04.2015).

2. Zabolotskiy L. V. *Krupnogabaritny kosmicheskiy skladnoy reflektor* [Large-size space folding reflector]. Patent RF, no. 2101811. 1998.

3. *Modelirovanie sistem gravitatsionnogo uravnoveshivaniya krupnogabaritnykh transformiruemykh konstruktsiy kosmicheskoy tekhniki* [Modeling of systems of a gravitational equilibration of the large-size transformed designs of space equipment]. Available at: http://cosmos.basnet.by/uiip_114.html (accessed 11.04.2015).

4. Usmanov D. B. *Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya krupnogabaritnogo transformiruemogo reflektora. Dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Modeling of the intense deformed condition of the large-size transformed reflector. Can. techn. sci. diss]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2006, 179 p.

5. Kirchin Yu. G. *Razrabotka i issledovanie optiko-elektronnykh sistem dlya kontrolya smeshcheniy. Dis. cand. tehn. nauk* [Development and research of optical-electronic systems for control of shifts. Can. techn. sci. diss]. St.Petersburg, SPbGITMO Publ., 1993, 193 p.

6. Albota Marius A., Brian F. Aull, Daniel G. Fouche and other. Three-Dimensional Imaging Laser Radars with Geiger-Mode Avalanche Photodiode Arrays. Lincoln Laboratory Journal. 2002, Vol. 13, No. 2, P. 351–370.

7. *Formirovanie svetovogo shablona krupnogabaritnykh ob"ektov metodami difraktsionnoy optiki* [Formation of a light template of large-size objects by methods of diffraction optics]. Available at: http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO37-4/ 370403.pdf (accessed 03.04.2015).

8. Dorofeev M. O., Bikeev E. V., Matylenko M. G., Titov G. P., Ris D. V. [The choice of instrument systems define the geometry of the large antenna transformed] *Materialy XV Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"* [Materials XV Intern. Scientific. Conf "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2011, P. 98–99 (In Russ.).

9. Demkin V. N. *Lazernye metody i sredstva izmereniya geometrii poverkhnostey slozhnoy formy. Dis. cand. tehn. nauk* [Laser methods and instruments for measuring the geometry of the surfaces of complex shape. Dr. techn. sci. diss]. Moscow, NII "Polyus" Publ., 2004, 247 p.

10. Dorofeev M. O., Bikeev E. V. [Methods of determining the relative position of two objects] *Razrabotka, proizvodstvo, ispytaniya i ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov i sistem. Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov OAO "Informatsionnye sputnikovye sistemy» imeni akademika M. F. Reshetneva", posvyashchennoy 50 letiyu poleta v kosmos Yu. A. Gagarina. Zheleznorogrsk* [Development, manufacture, testing and operation of spacecraft and systems. Proceedings of the scientific-technical conference of young specialists of JSC "Information Satellite Systems" named after academician MF Reshetnev" dedicated to the 50th anniversary of the space flight of Yuri Gagarin]. Ed. N. A. Testoedov. Zheleznogorsk, 2011, P. 233-234 (In Russ.).

11. Aleksandrov P. S. *Lektsii po analiticheskoy geometrii* [Lectures on analytical geometry]. Moscow, Nauka Publ, 1968, 176 p.

12. Foks A., Pratt M. *Vychislitel'naya geometriya. Primenenie v proektirovanie i na proizvodstve: perevod s angliyskogo* [Computing geometry. Application in designing and on manufacture: the transfer with English]. Moscow, Mir Publ., 1982. 304 p.

13. Zolotykh N. Yu. *Ispol'zovanie paketa Matlab v nauchnoy i uchebnoy rabote: Uchebno-metodicheskie materialy po programme povysheniya klassifikatsii "Informatsionnye tekhnologii i komp'yuternaya matematika"* [Use of a Matlab package in scientific and study: Educational and methodical materials according to the program of increase of classification "Information technologies and computer mathematics"]. Nizhny Novgorod, 2006, 165 p.

14. Zarubin V. S., Krishchenko A. P. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike: uchebnik dlya vuzov* [Mathematical modeling in engineering: a textbook for high schools]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2001, 496 p.

15. Strogalev V. P., Tolkacheva I. O. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Imitating modeling]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2008, 280 p.

© Дорофеев М. О., 2015

УДК 629.7.05

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 400–403

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ-МАХОВИК С МАГНИТОГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ ВРАЩЕНИЯ

Д. В. Ермаков

АО «Научно-производственный центр «Полюс»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET

Для уменьшения возмущающих механических моментов со стороны опоры вращения и увеличения ресурса работы электродвигателей-маховиков, входящих в систему ориентации и стабилизации космических аппаратов, предлагается применять магнитогидравлические опоры вместо шарикоподшипниковых узлов для вращения маховика. К основному элементу магнитогидравлической опоры относится магнитная жидкость, представляющая собой коллоидный раствор однодоменных магнитных частиц, покрытых тонким слоем защитной оболочки поверхностно-активных веществ, что предотвращает слипание частиц в жидкой основе, обладающая высокой текучестью и намагниченностью насыщения. Если немагнитное тело находится в зазоре, заполненном магнитной жидкостью, между двумя областями с повышенным значением магнитного поля, то оно центрируется между ними. Результатом работы является создание электродвигателя-маховика, выполненного на магнитогидравлических опорах с аварийными шарикоподшипниками, который позволяет увеличить стабильность работы роторной системы при вращении, когда на нее действуют не только осевые, но и радиальные силы смещения от внешних механических воздействий на корпус электродвигателя-маховика, и обеспечить необходимое положение вектора кинетического момента. А использование сигнала с датчиков вращения аварийных шарикоподшипников, когда маховик отклоняется из центрального уравновешенного положения, позволяет исключать ложные переключения комплектов электромагнитов при кратковременных ударных воздействиях на корпус электродвигателя-маховика.

Ключевые слова: магнитогидравлическая опора, аварийный шарикоподшипник, электродвигатель-маховик, магнитная жидкость, намагниченность насыщения, напряженность магнитного поля, магнитная частица, защитная оболочка, левитация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 400–403

REACTION WHEELS WITH MAGNETIC-HYDRAULIC BEARINGS

D. V. Ermakov

SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”
56v, Kirov Av., Tomsk, 634041, Russian Federation
E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET

To reduce the disturbing mechanical moments, generated by bearing side of rotating and increase the service life of reaction flywheel included in the system of orientation and stabilization system of the spacecraft, it is proposed to apply magnetohydraulic bearing instead of ball bearing assemblies for rotating flywheel. Magnetic fluid is the main element of magnetohydraulic bearing represented a colloidal solution of single-domain magnetic particles coated with thin layer of protective cover by surfaces actives substances that stave off conglutination of the particles in a liquid base, it has high flowability and saturation of magnetization. If the nonmagnetic object is in the gap filled with a magnetic fluid between the two areas with a higher magnetic field, it is centered between them. As a result, reaction wheels were designed by magnetic-hydraulic bearing with emergency bearing and it increases stability of working rotor’s system by rotation, while it experiences not only axled forces of displacement but also radial forces by outer mechanical disturbance on the frame. For the decrease of the mechanical disturbs moments from the bearing rotation and increase work’s resource of reaction flywheels entering in the system of orientation and stabilization of space apparatus, it is offered to apply magnetic-hydraulic bearings instead of ball-bearing unit to flywheel rotation.

Keywords: magnetic-hydraulic bearing, emergency bearing, reaction wheels, magnetic liquid, magnetization of saturation, intensity of the magnetic field, magnetic particle, protective cover, levitation.

Введение. Одним из основных свойств электродвигателей-маховиков (ЭДМ), входящих в систему ориентации и стабилизации космических аппаратов, является стабильность положения вектора кинетического момента. Формирование этого вектора определяется положением оси вращения ротора-маховика, которое напрямую зависит от возникающих возмущений в опорах вращения [1; 2].

Источник возникновения возмущений – вибрации в шарикоподшипнике, обусловленные его кинематикой и зависящие от частоты вращения его кольца. Кроме того, такие вибрации связаны с технологией производства самого шарикоподшипника и зависят от точности изготовления его деталей, качества рабочих поверхностей, их формы, разноразмерности тел качения, зазоров и т. д. Уровни вибраций по этим причинам значительны [3; 4].

Для повышения жесткости подшипникового узла подшипники нагружают начальной осевой силой, создавая преднатяг (например, за счет установки упругих элементов под одно из колец). Однако это приводит к тому, что шарики, катясь по постоянной дорожке качения, быстро достигают в отдельных точках поверхности предельного числа циклов нагружения, а следовательно, и максимального износа. Если при этом присутствует овальность колец и шариков, то интенсивность износа значительно возрастает [5; 6].

Описание конструкции опоры вращения. Для уменьшения влияния возмущений со стороны опоры вращения на вектор кинетического момента и стабилизации его положения предлагается использовать вместо шарикоподшипников магнитогидравлические опоры (рис. 1).

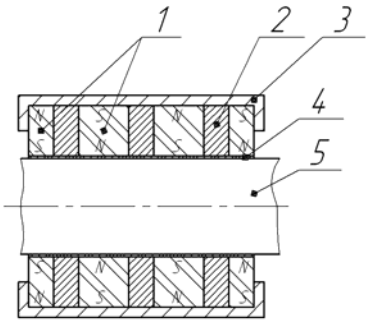


Рис. 1. Конструкция магнитогидравлической опоры

Опора состоит из кольцевых постоянных магнитов *1*, намагниченных в радиальном направлении, расположенных друг к другу разноименными полюсами, закрепленных через немагнитные вставки *2* в магнитопроводящем корпусе *3*. Немагнитный вал *5* центрируется внутри опоры магнитной жидкостью *4*, которая удерживается магнитным полем в зазоре между магнитами *1* и валом *5*. Потоки от внешних поверхностей магнитов *1* замыкаются через магнитопроводящий корпус *3*.

Описание магнитной жидкости. Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидный раствор однодоменных магнитных частиц в жидкой основе, обладает высокой текучестью и намагниченностью насыщения (до 100 кА/м). Каждая магнитная частица покрыта тонким слоем защитной оболочки поверхностно-активных веществ (ПАВ), что предотвращает слипание частиц, а тепловое движение разбрасывает их по всему объему жидкости. Поэтому, в отличие от обычных суспензий, частицы в магнитной жидкости не оседают на дно, и она может сохранять свои рабочие характеристики в течение многих лет (рис. 2) [7; 8].

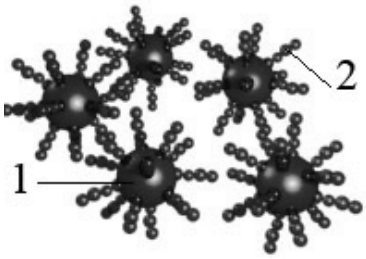


Рис. 2. Схема строения магнитной жидкости:
1 – магнитная частица; *2* – защитная оболочка с ПАВ

В магнитогидравлической опоре используется свойство данной жидкости перемещаться в область с наибольшей напряженностью под действием неоднородного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Явление, вытекающее из этого свойства, – левитация немагнитных тел в самой МЖ, которая концентрируется в области большего магнитного поля и выталкивает немагнитное тело. Если немагнитное тело находится в зазоре, заполненном МЖ, между двумя областями с повышенным значением магнитного поля, то оно центрируется между ними.

В общем случае предельную нагрузку на магнитогидравлическую опору, при которой немагнитный вал будет находиться во взвешенном состоянии, можно оценить по формуле [9; 10]

$$F_н = \mu_0 M_s H_м S,$$

где $F_н$ – несущая сила; M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости; $H_м$ – значение напряженности магнитного поля на поверхности немагнитного вала; S – площадь опоры в плоскости, перпендикулярной выталкивающей силе.

Описание конструкций ЭДМ. На рис. 3 изображено сечение электродвигателя-маховика с магнитогидравлическими опорами. Электродвигатель-маховик содержит роторную систему *A*, которая состоит из магнитогидравлических опор *6*, расположенных симметрично от маховика *1* с закрепленными на нем деталями электродвигателя *5*. Магнитогидравлическая опора *6* содержит кольцевые магниты *3*, поочередно установленные с немагнитными кольцами *2* в корпусах немагнитных втулок *4*, охватывающих вал маховика *8* и магнитной жидкости *7*, заполняющей зазор между кольцевыми магнитами *3* и валом маховика *8*.

Недостатком такого ЭДМ является отсутствие регулирования положения вала маховика вдоль оси вращения, что позволяет ему смещаться от установленного положения при воздействии на корпус ЭДМ внешних ударных нагрузок. В результате смещения

появившееся биение контактирующих поверхностей приведет к неуравновешенности роторной системы, а возникшие вибрации создадут динамическую нагрузку, что вызовет дополнительный дисбаланс всей системы вращения вала маховика.

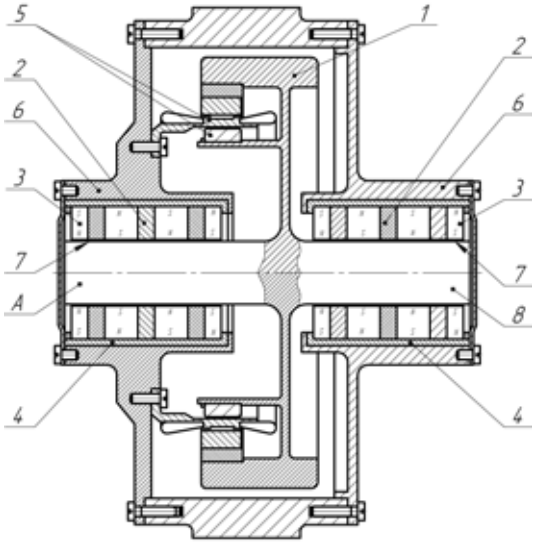


Рис. 3. ЭДМ с магнитогидравлическими опорами

Регулировка вала маховика вдоль оси вращения с помощью комплектов электромагнитов, расположенных на торцах магнитогидравлических опор, обеспечит необходимое уравновешенное состояние вала маховика в корпусе ЭДМ при внешних воздействиях на него (рис. 4) [11].

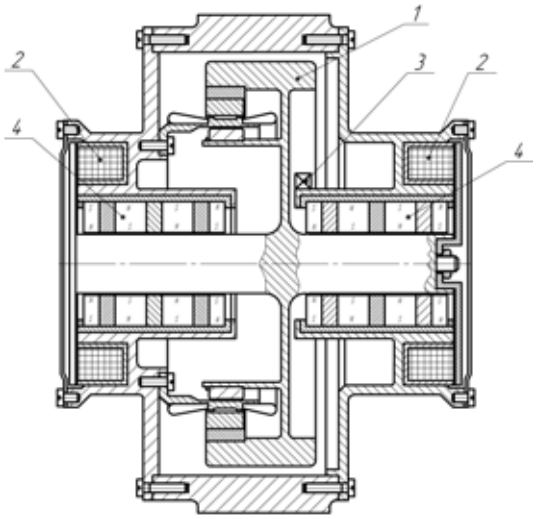


Рис. 4. ЭДМ с электромагнитным регулированием

Предлагаемое техническое решение позволяет повысить стабильность работы роторной системы, жесткость конструкции за счет удержания от смещения в осевом направлении вала маховика, что дает стабильность характеристик роторной системы при вращении, когда на нее действуют осевые силы смещения.

Регулирование вала маховика происходит следующим образом. При подаче питания на электродвигатель начинается вращение роторной системы, создавая кинетический момент, пропорциональный частоте вращения. При смещении вала маховика *1* от установленного положения в осевом направлении сигнал с датчика положения вала *3* поступает в схему управления электромагнитами *2*, которые возвращают вращающийся вал в магнитогидравлических опорах *4* в исходное положение.

Однако необходимо повышение надежности работы вала маховика, когда на него действуют не только осевые силы смещения, но и радиальные.

Указанная цель достигается тем, что в ЭДМ с магнитогидравлическими опорами, электромагнитами, датчиками положения маховика встроены аварийные шарикоподшипники и дополнительно введены датчики их вращения (рис. 5) [12].

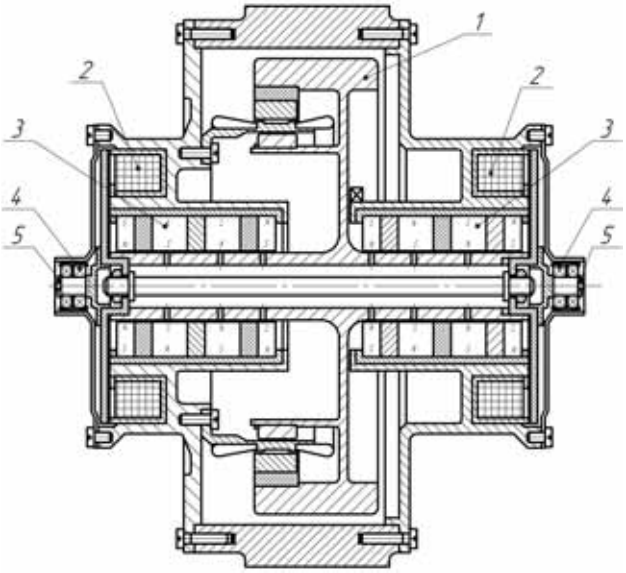


Рис. 5. ЭДМ с аварийными шарикоподшипниками

Регулирование вала маховика в данном случае осуществляется следующим образом. При радиальном смещении вала маховика *1*, когда на корпус воздействуют ударные нагрузки, его вращение компенсируется аварийными шарикоподшипниками *4*. Датчики вращения *5* выдают сигнал, поступающий в схему управления электромагнитами *2*, которые возвращают вал маховика *1*, вращающийся в магнитогидравлических опорах *3*, в исходное уравновешенное состояние.

Заключение. Создание ЭДМ, выполненного на магнитогидравлических опорах с аварийными шарикоподшипниками, позволяет повысить стабильность работы роторной системы, когда на нее действуют осевые и радиальные силы смещения, при механических ударах на корпус ЭДМ.

Преимущество использования сигнала с датчиков аварийных шарикоподшипников при отклонении маховика из центрального положения вплоть до касания об эти шарикоподшипники – возможность исключения ложных переключений комплектов электромагнитов благодаря косвенным сигналам с датчиков положения маховика при кратковременных ударных воздействиях на корпус ЭДМ [13–15].

В то же время магнитная жидкость служит смазывающим, демпфирующим звеном, что снижает момент трогания, уменьшает трение в опоре вращения и увеличивает ресурс работы.

Библиографические ссылки

1. Меркин Д. Р. Гироскопические системы. М. : Физматгиз, Наука, 1974. 344 с.
2. Ишлинский А. Ю. Механика гироскопических систем. М. : АН СССР, 1963. 484 с.
3. Самсаев Ю. А. Вибрации приборов с опорами качения. М. : Машиностроение, 1984. 128 с.
4. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. М. : Высш. шк., 1976, 456 с.
5. Тищенко О. Ф. Элементы приборных устройств. М. : Высш. шк., 1978. 384 с.
6. Проектирование механизмов и приборов / К. И. Заблонский [и др.]. Киев : Вища школа, 1971. 520 с.
7. Морозов Н. А., Казаков Ю. Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново : Изд-во Иванов. гос. энергет. ун-та им. В. И. Ленина, 2011. 264 с.
8. Орлов Д. В., Михалев Ю. О. Магнитные жидкости в машиностроении. М. : Машиностроение, 1993. 272 с.
9. Докучаев Л. В., Рабинович Б. И., Гришин А. В. О стабилизации вращающихся космических аппаратов с деформируемыми элементами на основе использования магнитогидродинамических эффектов // Полет. 2000. № 7. С. 21–27.
10. Рабинович Б. И., Гришин А. В. О новом принципе использования магнитогидродинамических эффектов для ориентации и стабилизации вращающихся космических аппаратов. Математическая модель КА с МГД-элементом // Полет. 2004. № 8. С. 34–37.
11. Пат. 2013118932 Российская Федерация. Электродвигатель-маховик / Алексанов П. А., Бобриков А. Н., Ермаков Д. В., Лянзбург В. П. ; заявитель и патентообладатель ОАО «НПЦ «Полюс». Опубл. 20.11.2013.
12. Пат. 2014114248 Российская Федерация. Электродвигатель-маховик / Алексанов П. А., Бобриков А. Н., Ермаков Д. В., Лянзбург В. П. ; заявитель и патентообладатель ОАО «НПЦ «Полюс». Опубл. 10.04.2014.
13. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. Применение магнитогидравлических элементов для разворота космического аппарата в инерциальном пространстве // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1 (62). С. 111–120.
14. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. Исследование динамики процесса разворота в инерциальном пространстве космического аппарата, оснащенного магнитогидродинамическим исполнительным органом // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 1 (66). С. 113–124.
15. Клишев О. П., Мытарев А. И., Рабинович Б. И. О стабилизации объектов с жидким наполнением на основе использования магнитогидродинамических эффектов // Полет. 2000. № 2. С. 40–44.

References

1. Merkin D. R. *Giroskopicheskie sistemy* [Gyroscopic systems]. Moscow, Phizmatgiz, Nauka Publ., 1974, 344 p.
2. Ishlinskiy A. Yu. *Mekhanika giroskopicheskikh syitem* [Mechanics of gyroscopic systems]. Moscow, AN SSSR Publ., 1963, 484 p.
3. Samsaev Yu. A. *Vibratsii priborov s oporami kacheniya.* [Vibrations of devices with rolling-contact bearings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 128 p.
4. Pervitskiy Yu. D. *Raschet i konstruirovanie tochnykh mekhanizmov*. [Calculation and design exact machinery]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1976, 456 p.
5. Tishchenko O. F. *Elementy pribornykh ustroystv*. [Elements of instrument devices). Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978, 384 p.
6. Zablonskiy K. I., Filipovich S. I., Tsetsorin N. A. et al. *Proektirovanie mekhanizmov i priborov* [Design of machinery and devices], Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1971, 520 p.
7. Morozov N. A., Kazakov Yu. B. *Nanodispersnye magnitnye zhidkosti v tekhnike i tekhnologiyakh.* [Nanodispersions magnetic liquid in techniques and technology]. Ivanovo, Ivanovskiy gos. energet. un-t imeni V. I. Lenina Publ., 2011, 264 p.
8. Orlov D. V., Mikhalev Yu. O. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii.* [Magnetic liquid in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ.,1993, 272 p.
9. Dokuchaev L. V., Rabinovich B. I., Grishin A. V. [About stabilization rotating space crafts with deformed element the base on magnetohydraulic effects]. *Polet*, 2000, No. 7, P. 21–27 (In Russ.).
10. Rabinovich B. I., Grishin A. V. [About a new principle of used magnetohydraulic effects for orientation and stabilization rotating space crafts]. *Polet*, 2004, No. 8, P. 34–37 (In Russ.).
11. Aleksanov P. A., Bobrikov A. N., Ermakov D. V., Lyanzburg V. P. *Elektrodvigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, No. 2013118932, 2013.
12. Aleksanov P. A., Bobrikov A. N., Ermakov D. V., Lyanzburg V. P. *Elektrodvigatel'-makhovik* [Reaction wheel]. Patent RF, No. 2014114248, 2014.
13. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [Application of magnetohydraulic element for turn of space crafts in inert spaces]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2011, No. I (62), P. 111–120 (In Russ.).
14. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [Research the dynamics process of the turn of space craft with magnetohydodinamic executive powers in inert spaces]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2012, No. I (66), P. 113–124 (In Russ.).
15. Klishev O. P., Mytarev A. I., Rabinovich B. I. [About stabilization of the objects with liquid filling the base on magnetohydraulic effects]. *Polet*, 2000, No. 2, P. 40–44 (In Russ.).

© Ермаков Д. В., 2015

УДК 629.78.064:537.5

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 404–410

ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЕ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Ю. М. Ермошкин, Ю. В. Кочев*, Д. А. Трофимчук, Е. Н. Якимов

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: koch@iss-reshetnev.ru

На элементах электрореактивных двигателей системы коррекции КА может накапливаться электростатический заряд вследствие воздействия высокоэнергетичных электронов магнитосферной плазмы. По достижении критического уровня возникает разряд. Воздействие электростатических разрядов на цепи двигательной подсистемы может привести к отказам оборудования, в том числе системы преобразования и управления (СПУ).

Решению проблем, связанных с воздействием электростатических разрядов на электрические цепи энергопреобразующего оборудования, предназначенного для питания и управления электрореактивными двигателями системы коррекции КА, в настоящее время уделяется большое внимание при разработке как двигателей и систем преобразования и управления ими, так и систем коррекции КА в целом. Это объясняется тем фактом, что стойкость СПУ к воздействию электростатических разрядов в её выходные силовые цепи рассматривается как один из факторов, определяющих надежность и безотказность указанного оборудования и, соответственно, системы коррекции КА в целом. Актуальность темы обусловлена широким применением электрореактивных двигателей в системах коррекции геостационарных КА, а также переходом на новые конструкции СПУ, предназначенные для негерметичных платформ КА, применением новой электронно-компонентной базы. Углубленное изучение вопросов, связанных с физикой накопления электростатического заряда в диэлектрических элементах КА, внешними условиями, способствующими указанному накоплению, и последующими электростатическими разрядами, позволяет по-новому подойти к интерпретации имевших место явлений при эксплуатации систем коррекции КА. Тем не менее для обеспечения прогнозирования и контроля процессов зарядки диэлектрических элементов блоков коррекции, а также введения оптимальных превентивных мер защиты энергопреобразующего оборудования требуется проведение комплекса научно-исследовательских работ.

Ключевые слова: плазменный двигатель, система преобразования и управления, электростатический разряд, магнитосферная плазма.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 404–410

ELECTROSTATIC DISCHARGE PROBLEM IN GEOSTATIONARY SPACECRAFT ELECTROJET PROPULSION SUBSYSTEM

Y. M. Ermoshkin, Y. V. Kochev*, D. A. Trofimchuk, E. N. Yakimov

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: koch@iss-reshetnev.ru

The electrostatic charge can collect on spacecraft electric propulsion thrusters’ elements owing to magnetospheric plasma high-energy electrons influence. There is a discharge on reaching critical level. Electrostatic discharge influence on electric circuits of propulsion subsystem can lead to equipment faults, including transformation and control systems (SPU).

To the decision of the problems connected with electrostatic discharge influence on electric circuits of the power-transform equipment, intended for a supply and control of spacecraft electric propulsion system now are given great attention to underway design as electric thrusters and their transformation and control systems, and spacecraft electric propulsion systems as a whole. The reason for that is the fact that SPU resistance to electrostatic discharge influence in its output power electric circuits is considered as one of the factors defining reliability and non-failure operation of these equipment and, accordingly, of spacecraft electric propulsion system as a whole. The theme urgency is caused by wide application of electric thrusters in geostationary spacecraft electric propulsion systems, and also conversion to the

new SPU designs intended on untight spacecraft platforms, using of new radio-electronic elements base. Profound studying of the questions connected with electrostatic charge accumulation in spacecraft dielectric elements physics, the external conditions promoting specified accumulation, and the subsequent electrostatic discharges, allows to approach in a new way to interpretation of the phenomena taking place at spacecraft electric propulsion systems operation. Nevertheless, complex of research works carrying out is required for maintenance of forecasting and supervision of electric propulsion charge processes, and also introduction of optimum preventive power-transform equipment protection measures.

Keywords: plasmic propulsion, transformation and control system, electrostatic discharge, magnetospheric plasma.

Введение. В составе отечественных геостационарных спутников связи для решения задач коррекции орбиты по долготе и наклонению, как правило, применяются электрореактивные двигательные подсистемы коррекции на базе стационарных плазменных двигателей [1–3] вследствие их повышенной экономичности по расходу рабочего тела по сравнению с двигателями на химическом топливе.

Такая подсистема включает в себя (рис. 1) несколько блоков коррекции (БК), которые, в свою очередь, состоят из собственно двигателя (анодный блок и два катода – основной и резервный) и блока газораспределения (БГР), обеспечивающего подачу рабочего тела в анод и в катоды с требуемым расходом, блок подачи рабочего тела (БПК), обеспечивающий понижение бакового давления до рабочего и один или несколько блоков хранения (БХК), в которых размещается запас рабочего тела на миссию КА. Преобразование напряжения бортовой сети в напряжения, необходимые для работы двигателя, и управление ими обеспечивается системой преобразования и управления (СПУ). Данная система представляет собой сложный электронный прибор, содержащий тысячи элементов. В ряде случаев на СПУ также возлагаются функции управления БПК.

Подсистема коррекции орбиты, как и любая сложная техническая система, не может обладать абсолютной надежностью. Поэтому она строится, исходя из основного принципа: отказ одного элемента не должен приводить к отказу системы. При этом под отказом системы понимается невозможность выполнения основной функции, которая в данном случае заключается в выдаче тяги в заданном направлении. Для выполнения основного принципа надежности система строится с применением резервирования, как поэлементного, так и функционального.

Как следует из рис. 1, СПУ является одним из важнейших элементов подсистемы коррекции. Практика эксплуатации с 1982 г. геостационарных КА с электрореактивной двигательной подсистемой показывает, что отказы БХК, БПК и двигателей крайне редки. Это связано с относительной простотой данных агрегатов и ограниченным количеством в них механических элементов. Применяемые в этих устройствах элементы, которые можно отнести к электрорадиоизделиям (провода, соединители), датчики, нагреватели отличаются простотой и высокой надежностью. Отказы механических элементов чрезвычайно редки, и в основном их причина – производственный брак, который, как правило, выявляется на наземных испытаниях и лишь в исключительных случаях может проявиться в натурной эксплуатации. Статистические данные, полученные при эксплуатации нескольких десятков спутников, позволяют говорить о том, что основным элементом, определяющим надежность подсистемы коррекции, является СПУ. Поэтому задача обеспечения безотказности работы этого прибора является приоритетной. Однако из-за нежелательности переусложнения прибора не всегда удается обеспечить полное резервирование узлов и отдельных элементов оборудования. Например, контакты коммутирующих элементов (реле) дублируются последовательно, но не параллельно, так как функция отключения двигателя более приоритетна по отношению к функции его включения, поскольку в случае отсутствия возможности отключения двигателя есть риск потери всего рабочего тела и, как следствие, потери КА, в то время как на другой чаше весов стоит отказ одного двигателя системы коррекции.

Анализ показывает, что существенным фактором, оказывающим влияние на работоспособность СПУ, могут являться электростатические разряды (ЭСР), возникающие под действием естественных факторов космического пространства в системе «двигатель–СПУ», поэтому возникает задача изучения данного явления и разработки способов и методов борьбы с ним. Указанная проблема является новой. Ранее она не была осознана и сформулирована, так как рассматриваемые явления носят во многом статистический, случайный характер. Частота возникновения ЭСР, количественные характеристики ЭСР (напряжение разряда, максимальный ток, электрический заряд) во многом зависят от внешних условий среды, температуры двигателя, его конструктивного размещения на борту КА. Кроме того, в СПУ разработки 1990-х и начала 2000-х годов применялись более мощные и, соответственно, более стойкие к процессам ЭСР выходные коммутаторы. Проблема стала более актуальной относительно недавно в связи с расширением масштабов применения электрореактивных двигателей на борту КА, переходом на новые конструкции СПУ, предназначенные для негерметичных платформ КА, применением новой электронно-компонентной базы.

Рассматриваемая проблема имеет важное прикладное значение, так как ее успешное решение позволит существенно повысить надежность выполнения функциональных задач двигательной подсистемой геостационарного КА. Настоящая работа посвящена постановке и предварительному рассмотрению проблемы ЭСР в системе «двигатель–СПУ».

1. Влияние ЭСР на работоспособность СПУ. По статистике отказы и аномалии СПУ в основном происходят по причине выхода из строя электронных

компонентов (ЭРИ). В свою очередь, отказы ЭРИ могут быть вызваны различными причинами. Они могут быть классифицированы следующим образом:

– единичные – при заводском браке, не выявленном в процессе испытаний на заводе-изготовителе;

– результат воздействия внешних факторов, таких как вакуум, механические нагружения, циклическое изменение температуры, космическая радиация, потоки тяжелых заряженных частиц.

Корректная трактовка отказов – сложная задача. Она решается посредством анализа телеметрической информации, данных по смежным подсистемам, результатов приемо-сдаточных испытаний оборудования, системы и КА. Трактовка отказов может быть уточнена с учетом накопленной статистики отказов по оборудованию, а также в случае углубленных исследований аналогичных отказов, полученных в процессе изготовления оборудования и его наземных испытаний. Так как двигатель принципиально размещен на внешней поверхности КА, на него могут попадать электроны магнитосферной плазмы из окружающего пространства (рис. 2). Эти электроны приносят на конструкцию двигателя, как и на все поверхности КА, отрицательный заряд.

Для анализа протекающих процессов необходимо отметить следующие особенности двигательной подсистемы:

– в состав двигателя входит керамическая разрядная камера, в которой происходит ионизация и ускорение рабочего тела (рис. 3) [4]. Керамика, как известно, является диэлектриком и может хорошо накапливать электрический заряд;

– ряд электрических цепей СПУ также подвергается непосредственному воздействию магнитосферной плазмы вследствие электрического соединения с металлическими элементами двигателя, такими как анод, катод, поджигной электрод катода.

Перечисленные особенности создают благоприятные условия для накопления электростатических зарядов как в электрических цепях СПУ, так и на диэлектрических элементах двигателей. Стоит отметить, что накопление электростатического заряда в электрических цепях СПУ будет происходить даже при отсутствии резистивной связи указанных цепей с корпусом КА и в случае нахождения соответствующих коммутаторов на выходе из СПУ в разомкнутом состоянии за счет наведенного заряда.

По достижении критического уровня зарядки диэлектрических элементов, в первую очередь керамики двигателя, вероятен электрический пробой на корпус или в ближайшие токоведущие элементы. Далее по кабелям и разъемам разряд может проникнуть внутрь СПУ (пробив по пути даже разомкнутые контакты коммутирующих реле).

Дальнейший путь прохождения разряда практически непредсказуем, однако вероятным результатом является выход из строя наиболее слабых узлов и элементов СПУ.

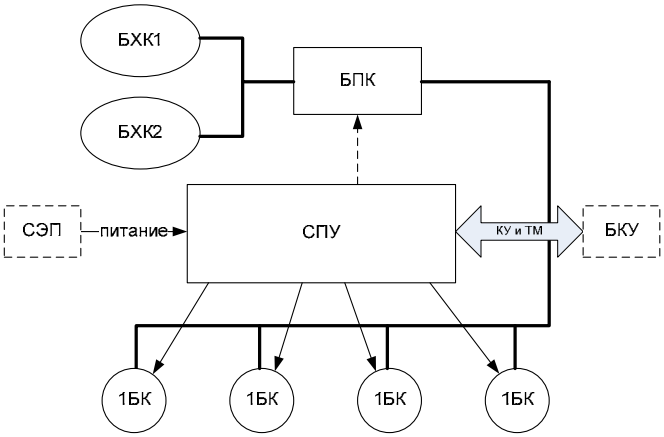


Рис. 1. Состав электрореактивной подсистемы коррекции орбиты геостационарного КА

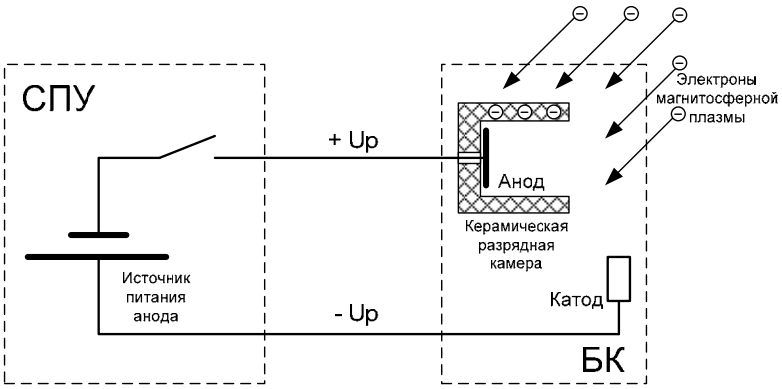


Рис. 2. Схема накопления электростатического заряда на элементах двигателя

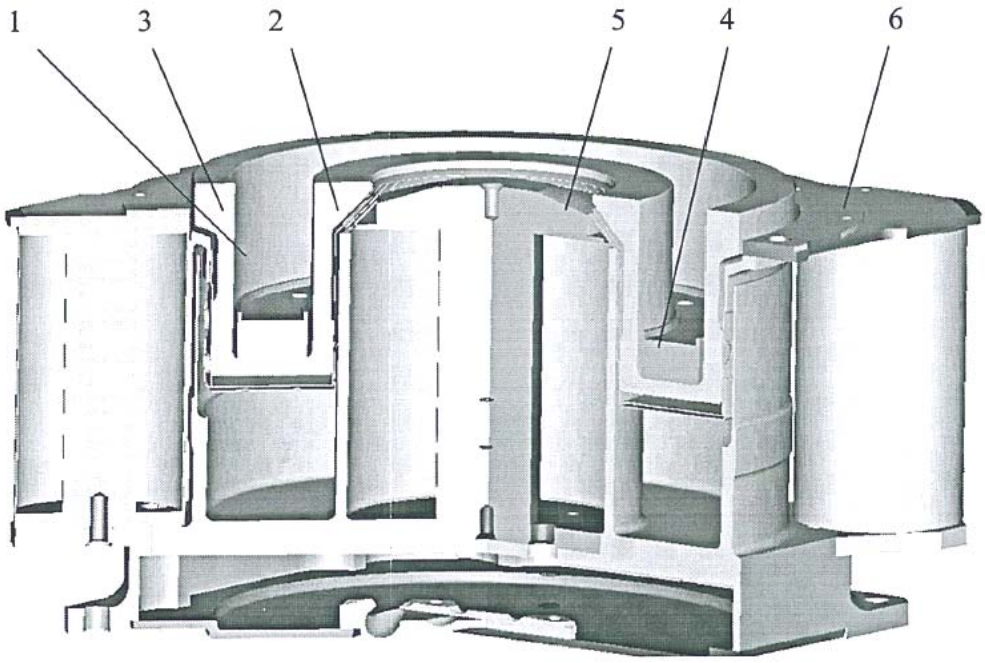


Рис. 3. Устройство анодного блока двигателя:
1 – газоразрядная камера; *2* – внутренняя стенка; *3* – наружная стенка; *4* – анод-газораспределитель; *5* – внутренний магнитный полюс; *6* – наружный магнитный полюс

2. Физический механизм зарядки диэлектрических конструктивных элементов блока коррекции. Процесс электризации обусловлен внешними условиями эксплуатации КА и в первую очередь определяется параметрами плазмы, присутствующей на орбите КА. Физический механизм зарядки КА в космической плазме можно наглядно проиллюстрировать, записав уравнение для полного тока [5], текущего через поверхность КА, в следующем виде:

$$J = J_e - J_i - (\delta J_e + \eta J_e + \gamma J_i + J_{ph}), \qquad (1)$$

где J_e и J_i – электронный и ионный токи плазмы; δ, η, γ – коэффициенты истинной вторичной электронной эмиссии, отражения электронов, ионно-электронной эмиссии; J_{ph} – ток фотоэлектронной эмиссии.

Входящие в уравнение (1) составляющие полного тока разделяются на две основные группы: первичные токи и вторичные токи. Первичные токи обусловлены непосредственным воздействием на поверхность КА электронов и ионов окружающей космической плазмы. Группа вторичных токов, представленная в уравнении (1) в круглых скобках, включает в себя вторично-эмиссионные токи с поверхности КА, вызываемые воздействием первичных токов космической плазмы, а также фотоэлектронный ток, обусловленный коротковолновым солнечным излучением.

В общем случае, вследствие того, что на поверхности КА располагаются различные диэлектрические элементы конструкции, имеет место неравномерная зарядка, называемая дифференциальной. При рассмотрении дифференциальной зарядки КА уравнение, аналогичное (1), можно записать для любого участка поверхности, характеризуемого определенными значениями вторично-эмиссионных коэффициентов, условиями попадания электронов и ионов окружающей плазмы на этот участок и условиями его освещения. В этом случае уравнение (1) описывает локальный суммарный ток, текущий через выбранный элемент поверхности, и с его помощью может быть определен равновесный потенциал этого элемента.

Равновесное значение потенциала КА либо изолированного участка поверхности КА определяется из решения уравнения (1) при $J = 0$. Стоит отметить, что приведенное уравнение баланса токов справедливо для всех типов орбит и областей космического пространства. При этом количественное значение потенциала элемента конструкции зависит как от параметров окружающей плазмы, определяющих первичные токи в выражении (1), так и от характеристик материала, от которых зависят значения вторичных токов в уравнении токового баланса. Так, за пределами магнитосферы Земли электризация КА обусловлена одновременным воздействием на поверхность аппарата ультрафиолетового излучения Солнца и плазмы солнечного ветра. Ток фотоэлектронной эмиссии в этих условиях является преобладающей составляющей, поэтому поверхность КА вне магнитосферы обычно заряжается положительно [6].

При рассмотрении внешних факторов, вызывающих электризацию геостационарных КА (рис. 4), наибольшее внимание следует уделять анализу характеристик горячей магнитосферной плазмы, поскольку именно она вызывает появление на КА наиболее высоких потенциалов [6].

Важно отметить, что на ГСО имеется три основных источника плазмы: солнечный ветер, полярная ионосфера и плазмосфера. Данные, полученные с КА GOES [7], показывают, что каждый из перечисленных источников может стать доминирующим при формировании плазмы высокой энергии на геостационарных орбитах (ГСО).

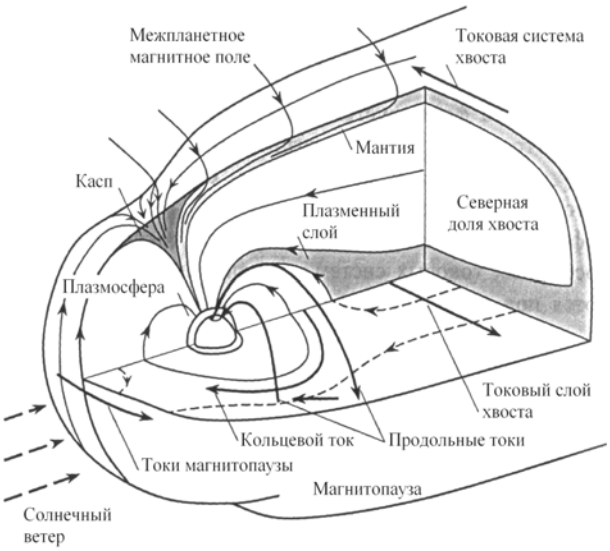


Рис. 4. Структура магнитосферы Земли (выделены характерные области околоземного пространства, в которых электромагнитные поля и распределение частиц обладают специфическими свойствами)

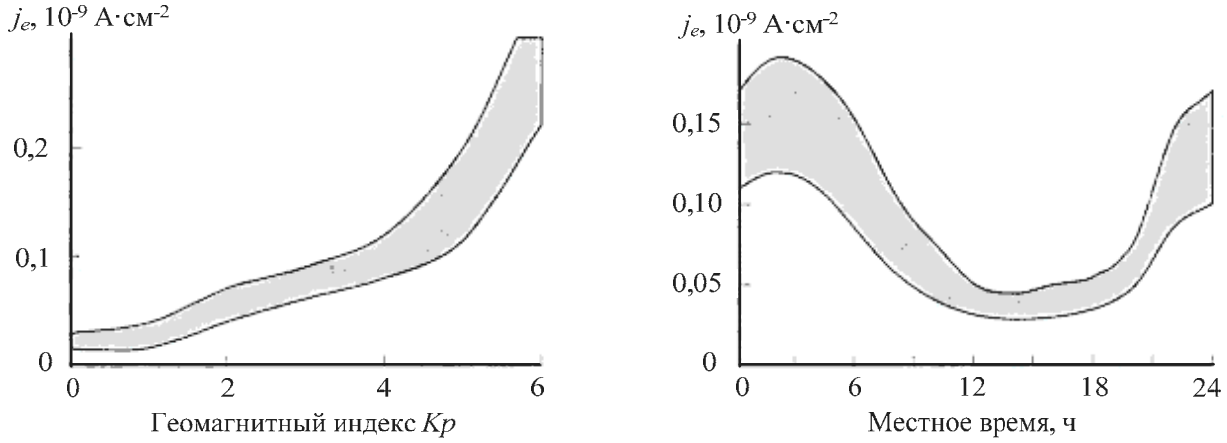


Рис. 5. Типичные изменения свойств электронных потоков магнитосферной плазмы в зависимости от геомагнитного индекса и местного времени подспутниковой точки

Энергетические спектры электронов и ионов горячей плазмы в области ГСО занимают диапазон энергий от 0,05 до 100 кэВ [4; 6; 8].

Орбита геостационарных спутников пролегает в областях магнитосферы, физические характеристики которых существенным образом зависят от местного времени точки нахождения спутника (рис. 5) [7]. Это связано с тем, что под воздействием потока заряженных частиц солнечной плазмы магнитное поле Земли сильно деформировано и на больших расстояниях от центра Земли существенно отличается от дипольного [9]. Расположение границ различных областей магнитосферы зависит от солнечной активности. При сильных солнечных бурях геостационарный космический аппарат в дневное время подспутниковой точки может выходить за пределы магнитосферы.

Кроме того, роль солнечного излучения в процессах электризации КА и его элементов на ГСО также очень велика [6], соответственно, уровень зарядки существенно зависит от тока фотоэлектронной эмиссии.

Также стоит отметить, что в космосе при воздействии на КА потоков электронов РПЗ с $E > 2$ МэВ, при значении флюенса электронов ~10^{10}–10^{11} см$^{-2}$, в диэлектриках возможно накопление объемного заряда и развитие объемных электрических разрядов [6; 10–14]. Оценки показывают, что при энергиях электронов порядка 5 МэВ глубина проникновения электронов в керамику двигателя может достигать порядка 5 мм [15]. Это говорит о том, что может иметь место не только поверхностная, но и объемная зарядка материалов двигателя.

Теоретический анализ показывает также, что на уровень зарядки диэлектрических поверхностей должна оказывать их температура. При этом, в общем случае, при повышении температуры уровень зарядки должен снижаться за счет рассасывания (стока) заряда

при более высоких уровнях тепловых колебаний атомов в узлах кристаллической решетки материала. Иными словами, чем выше температура материала, тем ниже должна быть его электростатическая зарядка и вероятность ЭСР. Способность накапливать заряд диэлектриками различного состава также может быть различной.

3. Направления исследований. С учетом изложенного выше, можно заключить, что проблема ЭСР в системе «двигатель–СПУ» носит сложный и многогранный характер. Необходимо выделить несколько аспектов, понимание и учет которых позволит осуществлять прогнозирование и контроль процессов зарядки диэлектрических элементов блоков коррекции:

– зарядка КА в космическом пространстве неизбежна; знак и величина равновесного потенциала КА зависит как от орбиты КА, так и от уровня солнечной активности;

– наибольшую опасность представляет дифференциальная зарядка различных элементов КА, что создает условия возникновения электростатических разрядов;

– с целью обеспечения равномерности зарядки всех элементов КА в условиях космического пространства необходимо, чтобы между поверхностью диэлектрических покрытий и металлическим корпусом КА обеспечивались токи утечки, превышающие токи зарядки;

– горячая плазма вызывает появление на КА наиболее высоких потенциалов; указанный потенциал может составлять от -10^3 до -10^4 В;

– горячая магнитосферная плазма вызывает объемную зарядку диэлектрических элементов конструкции блока коррекции за счет проникновения электронов высоких энергий в объем материала; в связи с этим обеспечение токов утечки с поверхности диэлектрического элемента конструкции двигателя не решает в полной мере вопрос выравнивания его потенциала относительно корпуса КА;

– уровень зарядки отдельных конструктивных элементов КА, в том числе двигателей, зависит от характеристик материала, их конструктивного исполнения и температуры; необходимо исследование этих зависимостей применительно к материалам, используемым в двигателях;

– учитывая возможность объемной зарядки, целесообразна реализация специальных мер, обеспечивающих минимизацию возможных последствий электростатических разрядов в электрических цепях между двигателем и СПУ;

– для разработки и реализации превентивных мер, направленных на защиту электрических цепей СПУ, связанных с двигателем, необходимы соответствующие знания, формирование которых возможно как теоретически, так и (в основном) с помощью проведения лабораторных исследований, обеспечивающих получение количественных параметров ЭСР в системе «двигатель–СПУ».

Условия проведения эксперимента должны быть максимально приближены к реальным с учетом худшего орбитального случая.

После получения экспериментальных результатов по изучению процессов ЭСР с различными типами двигателей необходимо их обобщение с целью построения математической модели, обеспечивающей прогнозирование зарядки электрореактивных двигателей произвольного исполнения, предусматривающей вариации конструктивного исполнения, применяемые материалы, а также условия эксплуатации.

Заключение. Таким образом, на основе теоретического анализа высказано предположение, что на работоспособность системы преобразования и управления двигателями могут влиять электростатические разряды со стороны двигателя, зарядка которого может быть обусловлена воздействием естественных факторов окружающей среды, в первую очередь, потоками электронов магнитосферной плазмы. Сформулирована задача изучения явлений ЭСР в системе «двигатель–СПУ», определены в первом приближении направления исследований. Поставлена задача разработки методов борьбы с данным явлением с целью повышения надежности функционирования двигательных систем геостационарных космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. State of the art and prospects of electric propulsion in Russia / V. Kim [et al.] // 28th International Electric Propulsion Conference (Toulouse, France, March 17–21, 2003). 10 p. IEPC-2003-340.
2. New Generation of SPT-100 / O. A. Mitrofanova [et al.] // 32nd International Electric Propulsion Conference (Wiesbaden, Germany, September 11–15, 2011). 7 p. IEPC-2011-041.
3. Development and qualification of Hall thruster KM-60 and the flow control unit / A. N. Kostin [et al.] // 33rd International Electric Propulsion Conference / The George Washington University (Washington, October 6–10, 2013). 11 p. IEPC-2013-055.
4. ESA ECSS E 10 04A. Space engineering: Space environment. 2000. 195 p.
5. Математическое моделирование электризации космических аппаратов / Л. С. Новиков [и др.] // Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л. С. Новикова. М. : КДУ, 2007. С. 276–314.
6. Модель космоса. В 2 т. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М. : КДУ, 2007. 1144 с.
7. Гаррет Г. Б., Спитейл Г. С. Моделирование ионосферной плазмы // Аэрокосмическая техника. 1986. № 3. С. 105–121.
8. MIL STD 1809(USAF). Space Environment for USAF Space Vehicles. 1991. 69 p.
9. Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. Томск : МГП «РАСКО», 1993. 208 с.
10. Акишин А. И. Радиационные аномалии в космическом оборудовании, вызванные электроразрядными явлениями в облученных диэлектриках // Новые наукоемкие технологии в технике : энциклопедия.

Т. 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л. С. Новикова, М. И. Панасюка. М., 2000. С. 5–60.

11. Акишин А. И. Методы радиационных испытаний космических материалов : учеб. пособие. М. : Изд-во МГУ, 2005. 143 с.

12. Frederickson A. R., Holeman E. G., Mullen E. G. Characteristics of Spontaneous Electrical Discharging of Various Insulators in Space Radiations // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. Vol. 39, No 6. P. 1773–1982.

13. HDBK 4002. Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects // NASA Technical Handbook. 1999. 45 p.

14. Wrenn G. L., Smith R. J. K. The ESD threat to GEO satellites: empirical models for observed effects due to both surface and internal charging // Environment Modeling for Space-based Applications : Proc. ESA Symp. (ESA SP 392), ESTEC. Noordwijk, 1996. P. 121–124.

15. Калашников Н. П., Ремизович В. С., Рязанов М. И. Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах. М. : Атомиздат, 1980. 272 с.

References

1. Kim V., Murashko V., Gorshkov O. et al. State of the art and prospects of electric propulsion in Russia. *28th international electric propulsion conference*. Toulouse, France, March 17–21, 2003, 10 p. IEPC- 2003-340.

2. Mitrofanova O. A., Gnizdor R. Yu., Murashko V. M., Koryakin A. I., Nesterenko A. N. New Generation of SPT-100. *32nd International Electric Propulsion Conference*, Wiesbaden, Germany. September 11–15, 2011, 7 p. IEPC-2011-041.

3. Kostin A. N., Lovtsov A. S., Vasin A. I., Vorovtsov V. V. Development and qualification of Hall thruster KM-60 and the flow control unit. *33rd International Electric Propulsion Conference*, The George Washington University, Washington, D.C. USA. October 6-10, 2013, 11 p. IEPC- 2013-055.

4. *ESA ECSS E 10 04A.* Space engineering: Space environment, 2000, 195 p.

5. Novikov L. S., Mileev V. N., Makletsov A. A., Sinolits V. V. et al. [Spacecrafts electrization mathematical modeling]. *Model' kosmosa. T. II. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy I oborudovanie kosmicheskikh apparatov*. [Space model. Vol. 2. Space environment influence on spacecraft materials and equipment]. Under the editorship of L. S. Novikova. Moscow, CDU Publ., 2007, P. 276–314.

6. *Model' kosmosa. T. 2. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* [Space model. Vol. 2. Space environment influence on spacecraft materials and equipment]. Under the editorship of M. I. Panasuka, L. S. Novikova. Moscow, CDU Publ., 2007, 1144 p.

7. Garret G. B., Spiteil G. S. Ionosperic plasma modeling. *Journal of Spacecraft and Rocets*. Vol. 22, No. 3, 1985, P. 231–244.

8. *MIL STD 1809(USAF).* Space Environment for USAF Space Vehicles, 1991, 69 p.

9. Grafodatsky O. S., Islyaev Sh. N. *Vzaimodeistvie sputnikov svyazi s okruzhaushei sredoi* [Telecommunication satellites interaction with environment]. Tomsk, MGP “RASKO” Publ., 1993, 208 p.

10. Akishin A. I. [Radiating anomalies in the space equipment, caused by the sputter-ion phenomena in irradiated dielectric]. *Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike. Entsiklopediya. T. 17. Vozdeistvie kosmicheskoi sredy na materialy I oborudovanie kosmicheskikh apparatov.* [New high technologies in the technician. The encyclopedia. Vol. 17. Space environment influence on spacecraft materials and equipment]. Under the editorship of L. S. Novikova, M. I. Panasuka, Moscow, 2000, P. 5–60.

11. Akishin A. I. *Metody radiatsionnykh ispytanii kosmisheskikh materialov* [Space materials radiating tests methods]. Moscow, MGU Publ., 2005, 143 p.

12. Frederickson A. R., Holeman E. G., Mullen E. G. Characteristics of Spontaneous Electrical Discharging of Various Insulators in Space Radiations. *IEEE Trans. Nucl. Sci*., 1992, Vol. 39, No. 6, P. 1773–1982.

13. NASA Technical Handbook, HDBK 4002. Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects, 1999. 45 p.

14. Wrenn G. L., Smith R. J. K. The ESD threat to GEO satellites: empirical models for observed effects due to both surface and internal charging. *Proc. ESA Symp. “Environment Modeling for Space-based Applications”*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1996 (ESA SP 392), P. 121–124.

15. Kalashnikov N. P., Remizovich V. S., Ryazanov M. I. *Stolknoveniya bystrykh zaryazhennykh chastits v tverdkyh telakh.* [Fast charged particles collisions in solids]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980, 272 p.

© Ермошкин Ю. М., Кочев Ю. В.,
Трофимчук Д. А., Якимов Е. Н., 2015

УДК 681.828

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 411–416

РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОДНОПЛОСКОСТНОЙ БАЛАНСИРОВКИ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ

А. В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина
Российская Федерация, 456770, г. Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Одной из задач, решаемых изготовителем на завершающем этапе общей сборки высокоскоростных летающих моделей для снижения вероятности появления аномальных режимов полёта, является приведение параметров массо-инерционной асимметрии к нормативам, заданным в эксплуатационной документации на модель. Определение параметров и уравновешивание модели выполняют с использованием специализированного контрольно-измерительного оборудования. Рассматривается алгоритм балансировочного расчёта, проводимый при уравновешивании модели в одной плоскости коррекции на вертикальном динамическом балансировочном стенде и позволяющий за один шаг балансировки либо привести параметры массо-инерционной асимметрии летающей модели к заданным нормативам, либо диагностировать невозможность для конкретной конструкции модели обеспечить указанные параметры. Верификация расчёта, проведённая по результатам балансировочного эксперимента, показала высокую точность полученных формул и возможность использования алгоритма при балансировке летающих моделей, обладающих единственной плоскостью коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модели.

Ключевые слова: вектор, тело вращения, ось симметрии, ось инерции, центр масс, плоскость коррекции, дисбаланс, балансировочный расчёт.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 411–416

DEVELOPING AND REFINING THE ALGORITHM OF SINGLE-PLANE DYNAMIC BALANCING OF A HIGH-SPEED FLYING PROTOTYPE

A. V. Klyuchnikov

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics named after academician E. I. Zababakhin
P.b. 245, 13, Vassilyeva Str., Snezhinsk, 456770, Russian Federation
E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

One of the major tasks that challenges manufacturer at a final assembly stage, aimed to reduce abnormal modes of flying for high-speed models of vehicles, is matching parameters of mass-inertia asymmetry with values, specified in operational documentation for the model. Both characterization and model's balancing are made with special check-out gauging equipment on final part of the common model's assemblage. Using of methods and equipment of dynamic balancing permits to increase accuracy of the parameters' measurements. In the paper the algorithm of balancing analysis is considered, when counterpoising the model within the only correction plane on the vertical balancing stand. And the correction plane is being on considerable distance from model's center of mass. It enables in a single step either bringing mass-inertia asymmetry parameters to predetermined values or diagnosing impossibility of meeting the above values for every specified model of flying model. The parameters are controlled under dynamic conditions. The flying machine is counterbalanced being a part of assembled rotor. The rotor supports are gas bearings, which has a great staunchness to wear and tear. Vertical position of rotation axis allows to exclude deformations of the body of flying model during the experiment. For measure of nonbalances of the model uses piezo-electric sensors. Processing of measuring signals conducts with use the methods of analogue filtering and digital filtering. Tuning the balancing stand fulfill with use of test weights, which mass are known, and which corner positions in planes of correction are known, too. Using of the algorithm allows to exclude of intermediate steps during the balancing experiment and to cut duration of this process. Verification of calculations, made after the results of balancing experiment, demonstrated high accuracy of obtained formulas and usability of the algorithm for precision balancing the flying models of the only correction plane that locates at a distance well removed from the center-mass of the model.

Keywords: vector, solid of rotation, symmetry axis, axis of inertia, center of mass, plane of correction, unbalance, balancing analysis.

Введение. Реализация аномальных режимов полёта высокоскоростной осесимметричной летающей модели (ЛМ), например, выполненной в виде стабилизированного вращением вокруг своей геометрической оси длинномерного конического модуля, приводит к снижению точности траекторного движения модели, сбоям и отказам в работе бортовых приборов и систем. Одним из условий движения ЛМ с заданной точностью по расчётной траектории, а также надёжного функционирования бортовой аппаратуры является определение и приведение на завершающем этапе общей сборки параметров её массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим заданных в эксплуатационной документации предельно допустимых значений. В последнее время наблюдается тенденция к ужесточению требований по точности определения и обеспечения параметров, определяющих асимметрию распределения масс относительно оси симметрии наружной поверхности (или геометрической оси) ЛМ, существенно влияющих на лётно-технические характеристики модели. К числу параметров массо-инерционной асимметрии относится величина поперечного смещения центра масс с геометрической оси и угол отклонения продольной главной центральной оси симметрии (ГЦОИ) относительно той же оси [1].

Зачастую при проектировании, конструировании и изготовлении высокоскоростной ЛМ стремятся обеспечить симметричность формы корпуса модели и совпадение оси её массовой симметрии с осью симметрии наружной поверхности, которая обычно принимается в качестве строительной. Однако невысокая точность теоретического расчёта параметров массо-инерционной асимметрии, как правило проводимого на этапе проектирования, делает актуальной задачу измерения этих параметров [1–3]. Измерения выполняют экспериментальным или расчётно-экспериментальным путём и с применением специализированного контрольно-измерительного оборудования. При этом симметричность формы обусловливает близость к нулю номинальных значений параметров массо-инерционной асимметрии, что, в свою очередь, определяет трудности процесса экспериментального определения этих параметров, например, по сравнению с контролем таких массо-центровочных и массо-инерционных характеристик (МЦИХ), как масса, продольное положение центра масс, моменты инерции, также определяемых экспериментально после изготовления и сборки модели. Ряд характерных особенностей высокоскоростных ЛМ, таких, в частности, как значительные габаритные размеры, неметаллическая наружная поверхность, наличие нежёстких элементов конструкции, отсутствие удобной технологической базы для закрепления на рабочем органе измерительного стенда, наличие единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс модели, налагают дополнительные ограничения на использование измерительного оборудования и способы выполнения измерений. Процедуру приведения значений параметров массо-инерционной асимметрии к заданным нормативам выполняют путём прикрепления корректирующих грузов к штатной плоскости коррекции, как правило конструктивно располагаемой вблизи торца корпуса модели, после её изготовления и сборки.

Для определения массы ЛМ обычно используют стандартные, например, платформенные весы, а определение других МЦИХ выполняют с применением контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные и технологические особенности контролируемых объектов и обеспечивающих требуемую точность измерений и безопасность проводимых работ. Координаты центра масс обычно определяют на центровочных стендах, реализующих весовой метод измерений, а для определения моментов инерции используют стенды, реализующие метод физического или крутильного маятника [2–4]. При этом расчёт величины поперечного смещения центра масс и угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси контролируемой модели выполняют по специальным методикам с использованием результатов измерений МЦИХ. Однако низкая точность стендового оборудования обоих перечисленных типов и малая производительность являются основными факторами, сдерживающими дальнейшее повышение точности определения и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии ЛМ.

В работах [4–6] отмечается, что в последнее время для определения параметров массо-инерционной асимметрии высокоскоростных летающих моделей наметилась тенденция к использованию методов и средств динамической балансировки, что обусловлено высокими характеристиками точности динамических балансировочных станков (стендов).

Расчётная схема балансировочного эксперимента. Для прецизионной низкочастотной (рабочая частота вращения не превышает 2 Гц) балансировки осесимметричных ЛМ конической формы в динамическом режиме спроектирована и изготовлена автоматизированная система контроля, построенная на базе вертикального дорезонансного динамического балансировочного стенда с жёсткими опорами, представляющими собой конические газостатические подшипники [7–10]. В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети низкого давления. Контролируемая модель, расчётная схема которой приведена на рис. 1, балансируется на стенде в составе сборного ротора, образуемого собственно ЛМ и специальным защитным технологическим переходником, выполненным в виде усечённого конуса и загружаемого непосредственно на газовые опоры.

Модель устанавливается на внутренние опоры переходника торцом вверх и фиксируется в одном из двух угловых положений относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180° [4; 11]. Применение переходника обеспечивает материализацию второй (нижней, обозначаемой символом «Н») плоскости коррекции и необходимо для настройки измерительной системы стенда и проведения балансировочного расчёта. При этом в качестве первой (верхней, обозначаемой символом «В») плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции ЛМ. В процессе балансировочного эксперимента выполняют

серию пусков сборного ротора как с пробными грузами, установленными в плоскостях коррекции, так и с ЛМ, установленной внутри технологического переходника в исходном положении. Измерения в исходном состоянии выполняют дважды для двух взаимно противоположных угловых положений ЛМ относительно технологического переходника с последующим усреднением результатов измерений, что позволяет исключить влияния собственных дисбалансов переходника на результаты измерений [11; 12]. В каждом пуске определяют амплитуды и фазы вибраций газовых опор на рабочей частоте вращения сборного ротора. При этом обработку измерительных сигналов выполняют с использованием комбинированного аналого-цифрового фильтра [13; 14].

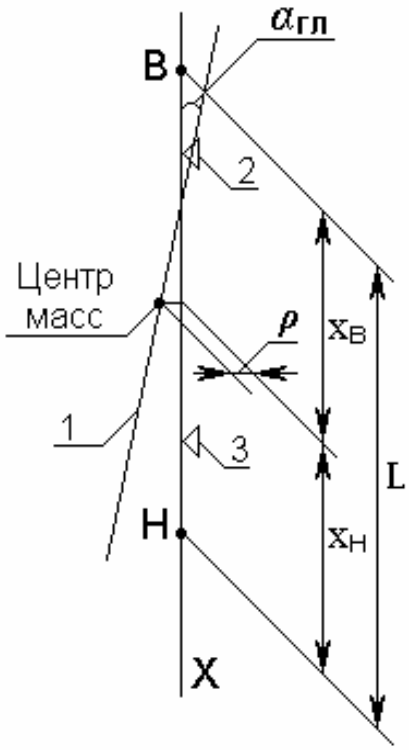


Рис. 1. Расчётная схема: *1* – продольная ГЦОИ; *2* и *3* – соответственно верхняя и нижняя опоры, выполненные в виде конических газостатических подшипников

По результатам измерений вибраций опор в пусках с пробными грузами рассчитывают коэффициенты чувствительности измерительной системы к дисбалансам и коэффициенты взаимовлияния плоскостей коррекции [15]. С использованием указанных коэффициентов, по результатам измерений вибраций опор в пусках сборного ротора с ЛМ, находящейся в исходном положении, определяют векторные параметры (значения и углы) начальных дисбалансов $\vec{D}_{\text{В}}$ и $\vec{D}_{\text{Н}}$, действующих соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции, и рассчитывают начальные параметры радиуса-вектора $\vec{\rho}$ поперечного смещения центра масс и вектор-угла $\vec{\alpha}_{\text{ГЛ}}$ перекоса продольной ГЦОИ модели относительно её геометрической оси по формулам [4; 11]

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_{\text{В}} + \vec{D}_{\text{Н}}}{M}; \quad \vec{\alpha}_{\text{ГЛ}} = \frac{1}{2}\arcsin\frac{2\left(\vec{D}_{\text{В}} x_{\text{В}} - \vec{D}_{\text{Н}} x_{\text{Н}}\right)}{I_{\text{э}} - I_{\text{а}}},$$

где M – масса ЛМ; $I_{\text{э}}$ и $I_{\text{а}}$ – соответственно её экваториальный и аксиальный моменты инерции.

Применение метода динамической балансировки позволило достигнуть погрешностей определения указанных параметров массо-инерционной асимметрии, не превышающих соответственно 0,01 мм и 1 угловой минуты, что в 5–6 и более раз превышает погрешности определения тех же параметров на стендах, реализующих методы статической балансировки.

В случае если начальное значение хотя бы одного из параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс ЛМ, превышает соответствующее предельно допустимое значение, заданное в эксплуатационной документации на модель, выполняют корректировку её массы. При этом использование коэффициентов взаимовлияния плоскостей коррекции позволяет расчётным путём определить массу и угловое положение балансировочного груза для его прикрепления к штатной плоскости коррекции модели либо показать невозможность обеспечения одновременно двух контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии по заданным нормативам (в этом случае балансировка завершается, а модель направляется на перекомпоновку). Следует отметить, что балансировочный расчёт может быть проведён с оптимизацией по критерию достижения минимального значения любого из параметров без выполнения дополнительных шагов балансировки. Учитывая, что на практике балансировщики стремятся достичь минимального значения поперечного смещения центра масс, обеспечивая при этом допустимое по документации на модель значение угла перекоса продольной ГЦОИ, рассмотрим вариант балансировочного расчёта с оптимизацией параметров по критерию достижения минимального поперечного смещения центра масс.

Алгоритм обеспечения параметров асимметрии масс. Сначала ЛМ расчётным путём приводят к режиму квазистатической неуравновешенности, когда её геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются не в центре масс, для чего с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют устранение действия начального дисбаланса в штатной (верхней) плоскости коррекции введением в этой плоскости равного ему по значению, но противоположного по направлению компенсирующего дисбаланса $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{КОМП}}$ [6]. Эта процедура позволяет упростить последующие вычисления и перейти при расчётах коллинеарных векторов дисбалансов к операциям с одномерными величинами. Затем с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции моделируют введение в штатной плоскости коррекции корректирующего дисбаланса $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{КОРР}}$, равного по значению, но противоположного по направлению дисбалансу $\vec{D}_{\text{Н}}^{\text{КОМП}}$, сформировавшемуся в нижней плоскости коррекции в результате предыдущего шага моделирования. Это позволяет

устранить поперечное смещение центра масс с геометрической оси и виртуально перевести ЛМ в режим моментной неуравновешенности, когда геометрическая ось и продольная ГЦОИ пересекаются в центре масс. Оценивают угол перекоса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси ЛМ, который будет предположительно образован в результате моделирования компенсирующего и корректирующего дисбалансов, по формуле

$$\alpha_{\text{ГЛ}}^{\text{КОРР}} = \frac{1}{2}\arcsin\frac{2D_{\text{В}}^{\text{КОРР}}L}{I_{\text{э}} - I_{\text{а}}},$$

где $L = x_{\text{В}} + x_{\text{Н}}$ – соответственно расстояние между верхней и нижней плоскостями коррекции; $D_{\text{В}}^{\text{КОРР}}$ – значение дисбаланса, смоделированного в верхней плоскости коррекции, для перевода контролируемой модели в состояние моментной неуравновешенности с учётом взаимовлияния плоскостей коррекции.

В случае если значение $\alpha_{\text{ГЛ}}^{\text{КОРР}}$ не превышения предельно допустимого значения данного параметра $\alpha_{\text{ГЛдоп}}$, то значение и угол балансировочного вектора $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{БАЛ}}$ рассчитывают как геометрическую сумму компенсирующего и корректирующего дисбалансов в верхней плоскости коррекции по формулам

$$D_{\text{В}}^{\text{БАЛ}} = \sqrt{D_{\text{В}}^{\text{КОМП2}} + D_{\text{В}}^{\text{КОРР2}} +}$$

$$+\sqrt{2D_{\text{В}}^{\text{КОМП}}D_{\text{В}}^{\text{КОРР}}\cos\left(\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} - \alpha_{\text{В}}^{\text{КОРР}}\right)};$$

$$\alpha_{\text{В}}^{\text{БАЛ}} = \operatorname{arctg}\frac{\sin\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} + \sin\alpha_{\text{В}}^{\text{КОРР}}}{\cos\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} + \cos\alpha_{\text{В}}^{\text{КОРР}}},$$

где $\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{КОМП}}$; $\alpha_{\text{В}}^{\text{КОРР}}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{КОРР}}$. А затем по законам статики рассчитывают массу и угол установки балансировочного груза в штатной плоскости коррекции и корректируют массу ЛМ. В противном случае рассчитывают предполагаемое (одновременно являющееся минимально возможным для данного варианта компоновки контролируемой модели) значение поперечного смещения центра масс, задавая значение угла перекоса продольной ГЦОИ равным предельно допустимому значению, по формуле

$$\rho_{\text{мин}} = \frac{D_{\text{Н}}^{\text{КОМП}} + \dfrac{\left(I_{\text{э}} - I_{\text{а}}\right)\dfrac{\sin 2\alpha_{\text{ГЛдоп}}}{2} - D_{\text{Н}}^{\text{КОМП}}x_{\text{Н}}}{x_{\text{В}} + K_{\text{НВ}}x_{\text{Н}}}\left(K_{\text{НВ}} - 1\right)}{M},$$

где $K_{\text{НВ}}$ – коэффициент влияния верхней (штатной) плоскости коррекции на нижнюю плоскость коррекции при наличии дисбаланса в верхней плоскости коррекции; $D_{\text{Н}}^{\text{КОМП}}$ – значение дисбаланса, действующего в нижней плоскости коррекции, после компенсации начального дисбаланса, действующего в верхней плоскости коррекции. Далее, в случае если значение $\rho_{\text{мин}}$ будет превышать предельно допустимое значение параметра $\rho_{\text{доп}}$, то балансировочный эксперимент прекращают, а контролируемую модель бракуют и направляют на перекомпоновку. В ином случае определяют значение вектора дисбаланса $\vec{D}_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}$, сонаправленного вектору $\vec{D}_{\text{В}}^{\text{КОРР}}$ и обеспечивающего достижение минимально возможного смещения центра масс для варианта, когда угол перекоса продольной ГЦОИ равен $\alpha_{\text{ГЛдоп}}$, по формуле

$$D_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}} = D_{\text{Н}}^{\text{КОМП}} + \frac{\left(I_{\text{э}} - I_{\text{а}}\right)\dfrac{\sin 2\alpha_{\text{ГЛдоп}}}{2} - D_{\text{Н}}^{\text{КОМП}}x_{\text{Н}}}{x_{\text{В}} + K_{\text{НВ}}\cdot x_{\text{Н}}}\left(K_{\text{НВ}} - 1\right).$$

Затем определяют значение и угол балансировочного вектора по формулам

$$D_{\text{Вмин}}^{\text{БАЛ}} = \sqrt{D_{\text{В}}^{\text{КОМП2}} + D_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР2}} +}$$

$$+\sqrt{2D_{\text{В}}^{\text{КОМП}}D_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}\cos\left(\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} - \alpha_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}\right)};$$

$$\alpha_{\text{Вмин}}^{\text{БАЛ}} = \operatorname{arctg}\frac{\sin\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} + \sin\alpha_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}}{\cos\alpha_{\text{В}}^{\text{КОМП}} + \cos\alpha_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}},$$

где $\alpha_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}$ – угловое положение дисбаланса $\vec{D}_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}}$. После чего по законам статики рассчитывают массу и угловое положение балансировочного груза и корректируют массу ЛМ.

На рис. 2 показаны расчётные дисбалансы, действующие в плоскостях коррекции в процессе и по окончании приведения значений параметров массо-инерционной асимметрии ротора к значениям, не превышающим заданных предельно допустимых значений.

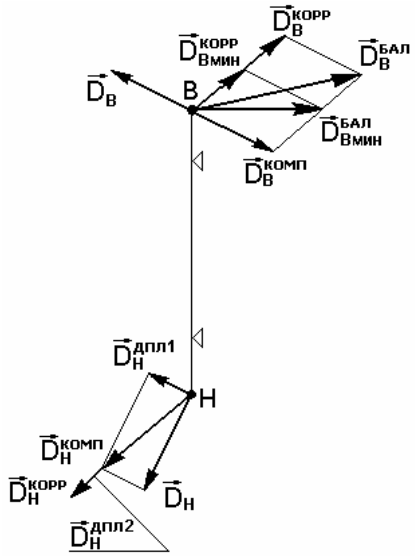


Рис. 2. Диаграмма балансировочного расчёта

При проведении расчёта дополнительные дисбалансы $D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ1}}$, $D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ2}}$ и $D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ3}}$ (не показан), появляющиеся в нижней плоскости коррекции в результате влияния на неё верхней плоскости коррекции, при формировании в ней соответствующих компенсирующего и корректирующих дисбалансов, вычисляют по формулам

$$D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ1}} = D_{\text{В}}^{\text{КОМП}} K_{\text{НВ}};$$

$$D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ2}} = D_{\text{В}}^{\text{КОРР}} K_{\text{НВ}};$$

$$D_{\text{Н}}^{\text{ДПЛ3}} = D_{\text{Вмин}}^{\text{КОРР}} K_{\text{НВ}}.$$

Заключение. Рассмотренный алгоритм обеспечивает прецизионное приведение одновременно двух контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии к значениям, не превышающим соответствующих предельно допустимых значений, с оптимизацией по критерию достижения минимального смещения центра масс с геометрической оси модели. При этом сокращается число шагов балансировки и время балансировочного эксперимента. Точность приведения контролируемых параметров асимметрии к заданным нормативам обеспечивается точностью измерений сигналов дисбалансов [13], а также точностью вычисления массы и углового положения балансировочного груза в ходе балансировочного расчёта. Алгоритм и способ балансировки роторного объекта в единственной плоскости коррекции, расположенной на значительном расстоянии от центра масс объекта контроля, защищён патентом РФ на изобретение [16]. Экспериментальное опробование расчётного алгоритма и способа балансировки, проведённого на вертикальном балансировочном стенде с опорами, выполненными в виде конических газостатических подшипников, подтвердило его высокую точность и эффективность.

Библиографические ссылки

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.

2. Миронов А. Д., Владычин Г. П., Кондратов А. А. Методы исследований на летающих моделях. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.

3. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.

4. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей / В. В. Ильиных [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 191–196.

5. Андреев С. В., Ключников А. В., Михайлов Е. Ф. Перспективы применения метода динамической балансировки для определения параметров асимметрии масс летательного аппарата // Решетнёвские чтения : тр. XVIII Междунар. науч. конф. Красноярск, 2014. Ч. 1. С. 8–10.

6. ГОСТ 22061–76. Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. М. : Изд-во стандартов, 1977. 139 с.

7. Пат. 2292533 Российская Федерация. Балансировочный стенд с вертикальной осью вращения / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. Опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

8. Абышев Н. А., Андреев С. В., Ключников А. В. Конструктивные особенности стенда для диагностики характеристик асимметрии масс летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 1. С. 39–45.

9. Ключников А. В. Испытательное оборудование для диагностики симметричности распределения масс сложных роторных деталей // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. Сочи, 2012. С. 362–364.

10. Ключников А. В., Лысых А. В., Чертков М. С. Метрологические аспекты модели уравновешивания летательного аппарата на динамическом балансировочном стенде // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1. С. 43–48.

11. Пат. 2292534 Российская Федерация. Способ балансировки ротора / Глазырина Л. М., Карповицкий М. С., Ключников А. В., Мальгин А. И., Смирнов Г. Г., Фомин Ю. П. Опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.

12. Ключников А. В., Самарцев А. А., Симонова Н. Ф. Алгоритм функционирования компьютерной программы стенда исследования характеристик асимметрии распределения масс тела // Надежность и качество – 2012 : тр. междунар. симпозиума. Пенза, 2012. Т. 1. С. 319–322.

13. Peculiarities of measuring signals processing during detail’s dynamic counterbalancing) / S. V. Andreev [et al.] // Innovative Information Technologies : Materials of the International scientific-practical conference : in 3 parts. Part 3. M., 2014. P. 238–242.

14. Автоматизация измерений параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс летающих моделей / С. В. Андреев [и др.] // Рдултовские чтения – 2012 : тр. III Всерос. науч.-техн. конф. СПб., 2013. С. 119–125.

15. Ключников А. В. Настройка балансировочного стенда: к вопросу повышения точности измерения параметров асимметрии масс тела // Информационно-измерительная техника и технологии : тр. III науч.-практ. конф. Томск, 2012. С. 52–55.

16. Пат. 2499985 Российская Федерация. Способ балансировки ротора в одной плоскости коррекции / Ключников А. В. Опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. *Ballistika neupravlyaemikh letatelnikh apparatov* [Ballistics of uncontrollable flying machines]. Snezhinsk, RFNC-VNIITF Publ., 1999, 496 p.

2. Mironov A. D., Vladychin G. P., Kondratov A. A. *Metody issledovaniy na letayushchikh modelyakh* [Methods of investigations on flying models]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 144 p.

3. Shchepetilnikov V. A. *Osnovy balansirovochnoi tekhniki. Tom 1* [Fundamentals of balancing technique. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 527 p.

4. Ilinykh V. V., Klyuchnikov A. V., Mihailov E. F., Timoshchenko A. G. [Technological support of quality during the manufacture of hypersonic uncontrollable flying models]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3 (49), P. 191–196 (In Russ.).

5. Andreyev S. V., Klyuchnikov A. V., Mihailov E. F. [Prospects of application of dynamic counterbalancing method for testing of flying machine's mass-inertia asymmetry parameters]. *Trudy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniia"* [Proc. 18th Int. Technol. Conf. "Reshetnev readings"]. Krasnoyarsk, 2014, Part 1, P. 8–10 (In Russ.).

6. *GOST 22061–76. Mashiny i tekhnologicheskoe oborudovanie. Sistema klassov tochnosti balansirovki* [State Standard 22061-76. Machines and equipment. The system of rules of counterbalancing precision]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 139 p. (In Russ.).

7. Glazyrina L. M., Karpovitskiy M. S., Klyuchnikov A. V., Malgin A. I., Smirnov G. G., Fomin Yu. P. *Balansirovochnyi stend s vertikalnoi osyu vrashcheniya* [Balancing stand with vertical axis of gyration]. Patent RF, no. 2292533, 2007.

8. Abyshev N. A., Andreev S. V., Klyuchnikov A. V. [Features of a stand for diagnostics the mass-inertia characteristics of flying machines]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie.* 2015, No. 1, P. 39–45 (In Russ.).

9. Klyuchnikov A. V. [Test equipment for diagnostics of a mass symmetry distribution of compound rotor's detailes]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy"*. [Proc. 9th Int. Technol. Conf. "Innovations based on information and communication technologies"]. Sochi, 2012, P. 362–364 (In Russ.).

10. Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Chertkov M. S. [Metrological aspects of flying machine's counterbalancing model on dynamic balancing stand]. *Vestnik Kontserna PVO "Almaz-Antey*". 2015, No. 1, P. 43–48 (In Russ).

11. Glazyrina L. M., Karpovitskiy M. S., Klyuchnikov A. V., Malgin A. I., Smirnov G. G., Fomin Yu. P. *Sposob balansirovki rotora* [Rotor's counterbalancing method]. Patent RF, no. 2292534, 2007.

12. Klyuchnikov A. V., Samartsev A. A., Simonova N. F. [Algorithm of functioning of computer program of the stand, which is created for investigations rotor's mass-inertia asymmetry characteristics]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadyozhnost I kachestvo"*. [Proc. 17th Int. Technol. Symp. "Reliability & Quality"]. Penza, 2012, Vol. 1, P. 319–322 (In Russ.).

13. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Mikhailov E. F., Lysykh A. V. Peculiarities of measuring signals processing during detail's dynamic counterbalancing. *Proc. 3rd Int. Technol. Conf. "Innovative Information Technologies"*. Moscow, 2014, Part 3, P. 238–242.

14. Andreev S. V., Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Chertkov M. S. [Automation of measuring parameters, which are showing in asymmetry in flying models' mass-inertia parameters]. *Trudy III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Rdultovskiye chteniia"* [Proc. 3rd Russ. Technol. Conf. "Rdultov readings"]. Sankt-Peterburg, 2013, P. 119–125 (In Russ.).

15. Klyuchnikov A. V. [Turning of a balancing stand: To the question about raising of precision during body's mass-inertia parameters measuring]. *Trudy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Informatsionno-izmeritelnaya tekhnika i tekhnologii"* [Proc. 3rd Russ. Technol. Conf. "Information and Measuring Technique and Technologies"]. Tomsk, 2012, P. 52–55 (In Russ.).

16. Klyuchnikov A. V. *Sposob balansirovki rotora v odnoy ploskosti korrektsii* [Method of rotor's counterbalancing in singular place for correction]. Patent RF, no. 2499985, 2007.

© Ключников А. В., 2015

УДК 621.372.88

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 417–422

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЯ В *Ka*/*Q*-ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ «ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ» СХЕМЫ

Ю. В. Крылов*, В. Б. Тайгин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru

Представлен принцип работы частотно-поляризационного селектора, основанный на использовании «восстанавливающей» схемы в виде двух ортомодовых селекторов, объединенных между собой для разделения частотных диапазонов приема и передачи. Поляризационное частотно-селективное устройство, разработанное по такой схеме, было реализовано в облучателе, который обеспечивает прием и передачу сигналов с круговой поляризацией в Ka- и Q-диапазонах. Роль частотно-селективного устройства в облучателе выполняет ортомодовый селектор, который предназначен для селекции приемо-передающих сигналов и их поляризационных составляющих. Одной из наиболее распространенных структур широкополосного ортомодового селектора является преобразователь в виде крестового разветвления. Данный крестовой разветвитель представляет собой волновод круглого сечения, к которому перпендикулярно его оси подключаются четыре взаимно перпендикулярных волновода прямоугольного сечения. Подключение данных волноводов происходит с помощью трансформаторов сложной формы для обеспечения лучшего согласования с волноводом круглого сечения. Такой тип селектора имеет структуру, обладающую некоторыми свойствами симметрии, которые делают систему широкополосной. Применение крестового разветвителя в качестве ортомодового селектора позволило расширить рабочую полосу частот. За счет введения различных неоднородностей в конструкцию данного селектора удалось разделить низкочастотные и высокочастотные составляющие спектра частот и добиться подавления паразитных составляющих высших мод. Восстановление сигнала обеспечивается вторым ортомодовым селектором, объединенным с первым с помощью четырех п-образных волноводных секций. Введение в конструкцию частотного селектора на высокочастотном выходе поляризатора, реализованного на круглом волноводе с пазом, и на низкочастотном выходе септум-поляризатора позволило на выходах данных поляризаторов принимать/передавать сигналы с круговой поляризацией. Использование такого принципа построения частотного селектора позволило разделить частоты приема и передачи без необходимости использования дополнительного отдельного облучателя под конкретный диапазон частот. Измеренные радиотехнические характеристики разработанного облучателя соответствуют современным требованиям, предъявляемым к облучающим системам, которые применяются в антенной технике спутниковой связи.

Ключевые слова: восстанавливающая схема, частотно-поляризационный селектор, облучатель, ортомодовый селектор, частотные диапазоны Ka, Q.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 417–422

DESIGN FEED ANTENNA *Ka*/*Q*-BAND BASED ON “REPAIRABLE” SCHEME

Y. V. Krylov*, V. B. Taygin

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
*E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru

In the article an operation principal of polarization frequency-selective device is presented which is based on “repairable scheme” composed of two joined orthomode selectors for dividing transmit-receive frequencies. The polarization frequency-selective device, being engineered according to this scheme was implemented in the feed antenna allows to ensure the transmitting and receiving signals with circular polarization over the Ka/Q-bands. The role of frequency-selective device in feed horn performs an orthomode selector for selecting which of transceiver signals and polarization components. One of the most common structures orthomode broadband selector is a cross-converter branching. This cross-splitter is a waveguide of circular cross section, which is perpendicular to the axis connecting the four mutually perpendicular rectangular waveguide. Connections of this waveguides occurs through transformers complex shape to provide better conformance with the waveguide of circular cross section. This type of selector has the structure pos-

sesses some symmetry properties, which make system of broadband. Using of cross-splitter as orthomode selector allowed to expand the operating bandwidth. Through the introduction of various irregularities in the construction of this selector able to separate low and high frequency components of the frequency spectrum and to achieve suppression of spurious higher modes. Recovering the second signal is provided with a combined orthomode first selector by four U-shaped waveguide sections. Introduction to the design of high-frequency selector on the output polarizer, implemented on a circular waveguide with a groove, and the low-frequency output of the septum polarizer, allowed for the release of data polarizers transmit / receive signals with circular polarization. Using this principle of construction of frequency selector allows to divide transmit-receive frequencies to save from necessary using if extra separate feed antenna. Measured electrical characteristics developed feed antenna according to the contemporary requirements which are demanded for feed antenna of satellite communication systems.

Keywords: repairable scheme, polarization frequency-selective device, feed antenna, orthomode selector, frequency bands Ka, Q.

Введение. Увеличение требования по частотному ресурсу современных спутников связи определяет необходимость в создании облучающих систем зеркальных антенн и глобальных рупорных антенн, работающих в более высоких и широких полосах частот как на прием, так и на передачу. Для увеличения пропускной способности каналов связи на современных спутниках также предъявляется требование по использованию сигналов с ортогональной поляризацией как на прием, так и на передачу. Помимо того, что современные облучающие системы должны работать в широкой полосе частот с сигналами различной поляризации, необходимо также, чтобы облучатель имел малые массогабаритные показатели.

Ортомодовый селектор – устройство, обеспечивающее частотную селекцию сигналов в облучателе [1]. В современных облучающих системах ортомодовый селектор выполняет не только функцию частотной селекции сигналов приема и передачи, но и функцию разделения их поляризационных составляющих. Ортомодовый селектор представляет собой пассивный волноводный разветвитель [2; 3], функцией которого является выделение двух ортогональных сигналов, полученных антенной. В зависимости от используемой конструкции селектора и применения в нем поляризационных устройств можно удвоить пропускную способность системы за счет использования двух разных сигналов с различной поляризацией, имеющих один и тот же спектр частот. Для того чтобы разрабатываемый селектор работал в широкой полосе частот, он должен иметь структуру, обладающую некоторыми свойствами симметрии. Самой распространенной такой структурой является ортомодовый селектор в виде крестового разветвителя [4; 5]. Наиболее сложными задачами при разработке селектора в виде крестового узла является проектирование конструкции его внутренних неоднородностей и диафрагм для разделения частот приема и передачи [6].

В рамках создания перспективных телекоммуникационных спутников АО «ИСС» было разработано поляризационное частотно-селективное устройство для облучателя зеркальной антенны для приема/передачи сигналов с круговой поляризацией в *Q*/*Ka*-диапазоне. В настоящей работе для решения задачи разделения сигналов с круговой правой/левой поляризацией для частот приема и передачи, разнесенных на октаву, предлагается применение конструкции на основе разработанной «восстанавливающей» схемы в виде двойного использования крестовых разветвителей.

Конструкция разработанного облучателя. Для того чтобы поляризационное частотно-селективное устройство разрабатываемого облучателя было широкополосно, было принято нестандартное конструкторское решение для разделения частот приема и передачи, а именно, использование «восстанавливающей» схемы, показанной на рис. 1. Для выполнения требований к облучателю по значениям коэффициента усиления, формы диаграммы направленности, коэффициента эллиптичности (КЭ) для заданной рабочей полосы частот, был использован гофрированный рупор *1*. Ортомодовый селектор *2*, расположенный сразу после рупора, представляет собой крестовой разветвитель в виде волновода круглого сечения, к которому перпендикулярно его оси подключены четыре взаимно перпендикулярных прямоугольных волновода. С прямого выхода *5* данного селектора осуществляется выделение высокочастотного сигнала приемного частотного диапазона. Введение в разрабатываемое частотно-селективное устройство дополнительного идентичного ортомодового селектора *4* позволяет восстановить на его выходе *6* низкочастотный сигнал передающего частотного диапазона за счет объединения между собой селекторов с помощью четырех волноводов *3* прямоугольного сечения, которые подключаются к крестовому разветвлению данных селекторов.

За счет использования четырех взаимно перпендикулярных п-образных волноводов равной длины и второго симметричного ортомодового селектора, выполняющего функцию восстановления сигнала, выполняется условие синфазности и ортогональности двух мод, распространяемых в круглом сечении волновода. Для дальнейшей возможности передачи сигнала с круговой поляризацией ко второму селектору необходимо подключить поляризующее устройство [7–11].

На рис. 2 показана электродинамическая модель разработанного поляризационного частотно-селективного устройства. Ортомодовый селектор *1* представляет собой крестовой разветвитель, в плечах которого установлены фильтры нижних частот *2* для подавления частотных составляющих сигнала приема. Диаметр волновода круглого сечения был рассчитан исходя из расчета распространения основной волны H_{11} в диапазоне частот передачи. В ортогональных плечах

волновода прямоугольного сечения должна распространяться волна H_{10}. Выход селектора представляет собой переход на сечение меньшего диаметра для распространения волны H_{11} в диапазоне частот приема и множественные изменения сечения круглого волновода для подавления паразитных составляющих высших мод, возникающих в круглом сечении волновода большего диаметра. К выходу переменного сечения первого селектора подключается поляризатор *4*, реализованный на круглом волноводе с развернутым на 45º пазом, и преобразователь с двумя ортогональными выходами. Оптимизируя геометрические размеры паза, можно добиться ортогональности мод с равной амплитудой и со сдвигом фаз 90º. Таким образом, с помощью данного поляризатора обеспечивается разделение ортогональных компонент сигнала с круговой поляризацией. Для удобства настройки поляризатора конструктивно закладывается возможность изменения глубины паза за счет установленного в паз регулируемого по высоте поршня. На выходах *5* поляризатора принимаются сигналы с круговой правой и левой поляризациями.

Для восстановления сигнала в частотном диапазоне передачи фильтры *2* соединяются со вторым ортомодовым селектором *6* посредством четырех п-образных волноводных секций *3* равной длины. Для лучшего согласования данных волноводов с волноводом круглого сечения применялись переходы различного сечения в месте их сочленения с волноводом круглого сечения. Один выход селектора короткозамкнут, ко второму выходу через трансформатор с круглого на квадратное сечение присоединен септум-поляризатор *7*. Для получения разности фаз 90º между ортогональными компонентами электромагнитной волны у такого поляризатора используется ступенчатая металлическая перегородка [12–14]. Преимущество данного поляризатора в том, что правая и левая круговая поляризации возбуждаются двумя входными каналами в виде прямоугольного волновода без необходимости создания дополнительных селективных устройств, как, например, в поляризаторе, который используется в высокочастотном диапазоне приема [15]. Выбор такого поляризатора в частотном диапазоне приема обусловлен сложностью изготовления септум-поляризатора в *Q*-диапазоне. С выходов *8* передаются сигналы с круговой правой и левой поляризациями.

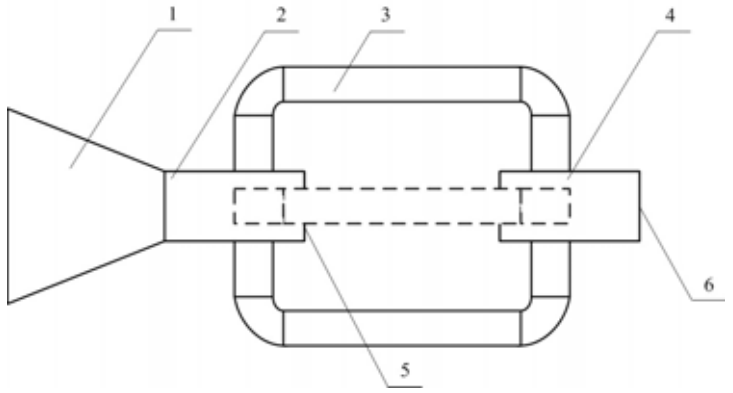


Рис. 1. Схема разработанного облучателя: *1* – рупор; *2*, *4* – крестовой селектор; *3* – волноводы; *5* – выход приемного сигнала; *6* – выход передающего сигнала

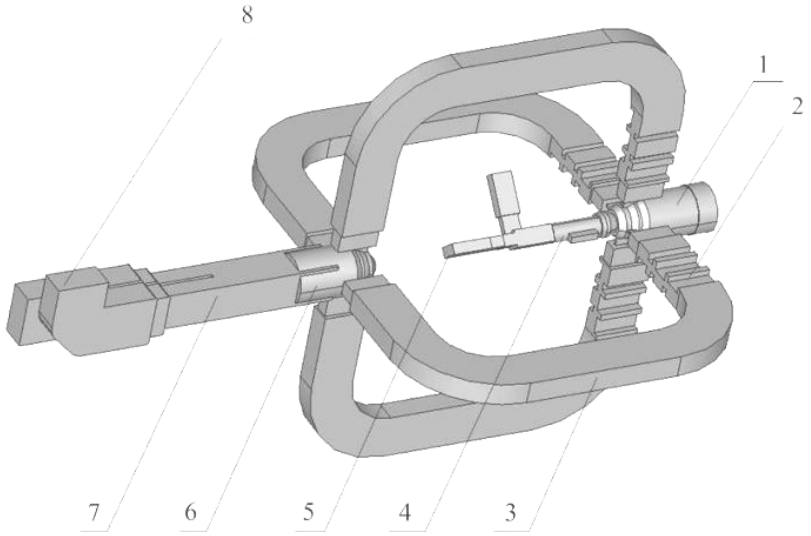


Рис. 2. Электродинамическая модель разработанного частотно-селективного устройства: *1*, *6* – крестовой селектор; *2* – фильтр нижних частот; *3* – волновод; *4* – поляризатор; *5* – выход приемного сигнала; *7* – септум-поляризатор; *8* – выход передающего сигнала

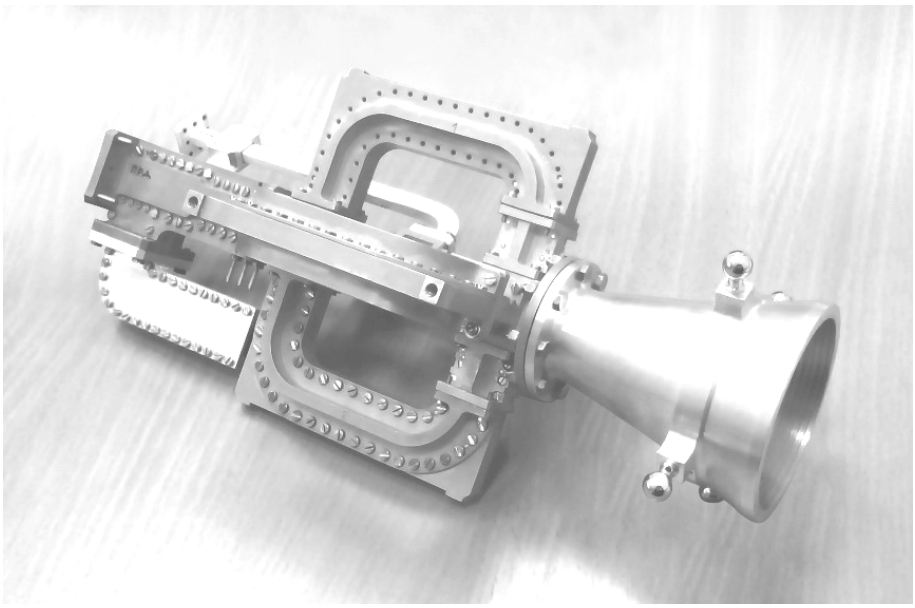


Рис. 3. Фотография изготовленного облучателя

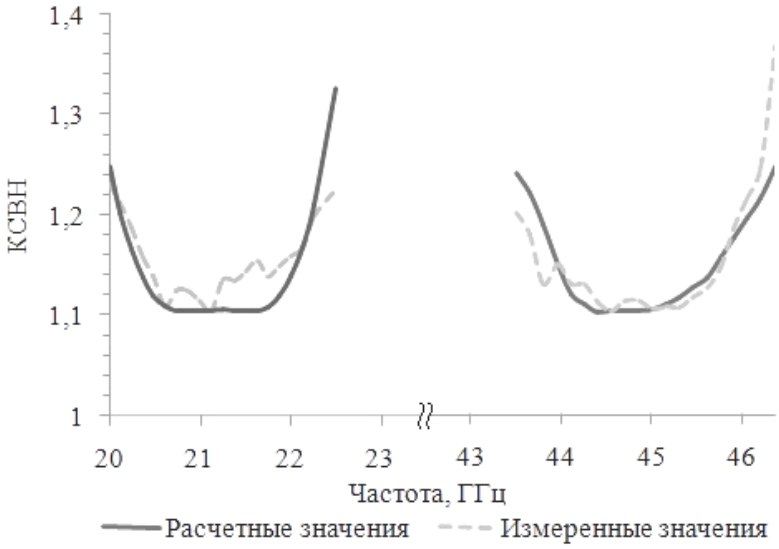


Рис. 4. КСВН селективного устройства в рабочих диапазонах частот

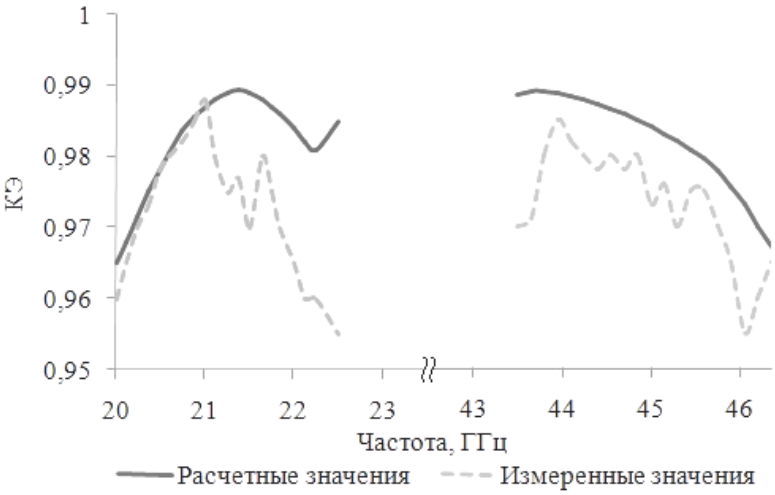


Рис. 5. График частотной зависимости КЭ селективного устройства
в рабочих диапазонах частот

Результаты. По результатам оптимизации электродинамической модели разработанного поляризационного частотно-селективного устройства, изображенного на рис. 2, был изготовлен облучатель, фотография которого представлена на рис. 3.

Рассчитанные и измеренные радиотехнические характеристики облучателя приведены на рис. 4–5.

Из рис. 4 видно, что рассчитанные и измеренные значения КСВН частотно-селективного устройства достаточно хорошо совпадают как по значению, так и по характеру частотной зависимости. Таким образом, рассчитанные и измеренные значения КСВН в диапазонах частот 20–22,25 ГГц и 43,5–46 ГГц составили не более 1,25.

Из рис. 5 видно, что рассчитанные и измеренные значения КЭ частотно-селективного устройства в диапазоне рабочих частот передачи 20–22,25 ГГц и приема 43,5–46 ГГц составили не менее 0,96, что обеспечивает значение кроссполяризационной развязки не менее 33,8 дБ.

Заключение. Разработанный облучатель позволяет обеспечивать прием и передачу сигналов с круговой поляризацией в *Ka*- и *Q*-диапазонах в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к облучающим системам спутниковой связи по значениям КЭ и КСВН. По результатам исследования спроектированного частотно-поляризационного селектора показана состоятельность применения разработанной «восстанавливающей» схемы в виде двойного использования крестовых ортомодовых селекторов в качестве частотно-селективного устройства. Реализация облучателя по данной схеме позволяет передавать/принимать сигналы с круговой поляризацией с помощью четырех п-образных волноводных секций и дополнительного ортомодового селектора, выполняющего функцию восстановления сигнала, обеспечивая условие синфазности и ортогональности двух мод, распространяемых в селекторе. Для дальнейшей возможности обеспечения сдвига фаз между ортогональными модами на 90º используется септум-поляризатор.

Также за счет применения «восстанавливающей» схемы при оптимальных значениях электрических характеристик в рабочих диапазонах частот решается задача уменьшения массогабаритных показателей облучающей системы, так как отсутствует необходимость использования дополнительного облучателя для разделения частот приема и передачи.

Библиографические ссылки

1. Gopal Narayanan, Neal R. Erickson. A Novel Full Waveguide Band Orthomode Transduser // Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology. Harvard University, 2002. P. 505–514.
2. CAD and Optimization of Compact Ortho-Mode Transducers / Ludovico [et al.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. Vol. 47, No. 12. P. 2479–2486.
3. Ignacio Izquierdo Martinez, Jorge A. Ruiz Cruz. Design of wideband orthomode transducers based on the turnstile junction for satellite communications. Universidad Autynoma de Madrid, 2008. P. 33–36.
4. Pozar D. M. Power Dividers and Directional Couplers // Microwave Engineering. Chap. 7. New York : John Wiley & Sons. Inc, 1998. P. 6-4.1–6-4.5.
5. Дёмин Д. А., Чубинский Н. П. Облучатель с двумя ортогональными круговыми поляризациями // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 11–23.
6. Тузбеков А. Р., Гольберг Б. Х. Широкополосный волноводный поляризационный селектор для диапазона *S* с малым поперечным размером // Радиолокация и радиосвязь : материалы IV Всерос. конф. / ИРЭ РАН. М., 2010. С. 76–82.
7. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. С. 434–435.
8. Milligan T. A. Modern Antenna Design. New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. P. 343–345.
9. Антенны эллиптической поляризации. Теория и практика : сб. ст. / пер. с англ. под ред. А. И. Шпунтова. М. : Иностранная литература, 1961. С. 367–370.
10. Спутниковая связь и вещание : справочник / под ред. Л. Я. Кантора. М. : Радио и связь, 1997. С. 528–531.
11. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. Справочник по элементам волноводной техники. М. : Связь, 1967. С. 652–655.
12. Pelosi G., Nesti R., Gentili G. G. Orthomode transducers. New York : Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005. P. 103–107.
13. Davis D., Digiondomenico O., Kempic J. A new type of circularly polarized antenna element // Antennas and Propagation Society International Symposium. 1967. Vol. 5. Pp. 26–33.
14. Полупанов В. Н., Яновский М. С., Князьков Б. Н. О физических принципах работы поляризационного фазовращателя // Радиотехника. 1979. № 1. С. 112–115.
15. Надель Ж. М. Волноводные линии связи. М. : Радио и связь, 1975. С. 234–236.

References

1. Gopal Narayanan, Neal R. Erickson. A Novel Full Waveguide Band Orthomode Transduser. Thirteenth International Symposium on Space Terahertz Technology, Harvard University, March 2002, P. 505–514.
2. Ludovico, et al. CAD and Optimization of Compact Ortho-Mode Transducers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Dec. 1999, Vol. 47, No. 12, P. 2479–2486.
3. Ignacio Izquierdo Martinez, Jorge A. Ruiz Cruz. Design of wideband orthomode transducers based on the turnstile junction for satellite communications. Universidad Autynoma de Madrid, Noviembre de 2008, P. 33–36.
4. Pozar D. M. Power Dividers and Directional Couplers. New York: Microwave Engineering - Chap. 7. John Wiley & Sons. Inc, 1998, P. 6-4.1–6-4.5.
5. Demin D. A., Chubinskii N. P. [Irradiator with two orthogonal circular polarizations]. *Zhurnal radioelektroniki.* 2014, No. 6, P. 11–23 (In Russ.).
6. Tuzbekov A. R., Golberg B. H. [Broadband waveguide polarization selector for a range of «S» with a small transverse dimension]. *Radiolokatsiya i radiosvyaz': materialy IV Vserossiyskoy konferentsii, IRE RAN* [Radar

and radio: Materials IV National Conference, IRE RAN]. Moscow, 2010, P. 76–82 (In Russ.).

7. Sazonov D. M. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, P. 434–435.

8. Milligan T. A. Modern Antenna Design. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, P. 343–345.

9. Shpuntov A. I. *Antenny ellipticheskoy polyarizatsii. Teoriya i praktika. Sb. Statey* [Antenna elliptical polarization. Theory and practice. Proc.]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1961, P. 367–370.

10. Cantor L. Y. *Sputnikovaya svyaz' i veshchanie. Spravochnik. Pod red. L. Ya. Kantora* [Satellite communications and broadcasting. Directory. Ed. Cantor L.Y.]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1997, P. 528–531.

11. Feldstein A. L., Yavich L. R., Smirnov V. P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook of elements waveguide technology]. Moscow, Svyaz' Publ., 1967, P. 652–655.

12. Pelosi G., Nesti R., Gentili G. G. Orthomode transducers. Wiley, New York: Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005, P. 103–107.

13. Davis D., Digiondomenico O., Kempic J. A new type of circularly polarized antenna element. A*ntennas and Propagation Society International Symposium,* 1967, Vol. 5, P. 26–33.

14. Polupanov V. N., Yanovsky M. S., Knyazkov B. N. [On the physical principles of operation of the polarization phase shifter]. *Radiotekhnika.* 1979, No. 1, P. 112–115 (In Russ.).

15. Nadel J. M. *Volnovodnye linii svyazi* [Waveguide link]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1975, P. 234–236 (In Russ.).

© Крылов Ю. В., Тайгин В. Б., 2015

УДК 002.53; 002.53:004.65; 002.53:004.62/.63

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 423–429

МЕТОДИКА НИСХОДЯЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М. В. Лихачев

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: max_kzk@catiaforum.ru

Технология нисходящего проектирования в сквозных системах 3D-моделирования и управления жизненным циклом изделия предоставляет значительные преимущества для аэрокосмических предприятий. Такой подход позволяет использовать параллельные бизнес-процессы и организовать эффективное управление изменениями в изделии. Он работоспособен не только для 3D-моделей на разных стадиях проектирования, но и для структур требований, а также функциональной и логической структур изделия. 3D-модель, разработанная с использованием принципов нисходящего проектирования, является неотъемлемой частью модели данных и процессов предприятия. Проанализированы существующие модели данных и процессов аэрокосмических предприятий и предложена новая модель, предполагающая полное использование возможностей современных PLM-систем и технологии нисходящего проектирования. Комический аппарат – достаточно специфичное изделие с точки зрения нисходящего подхода и схем геометрической параметризации. Рассматривается процесс 3D-моделирования КА как часть процесса управления структурой изделия. Процесс разработки 3D-модели изделия состоит из трех фаз. Функциональная схема изделия, связанная с логической или функциональной структурой изделия, описывает базовые размеры и компоновку КА. Проектный электронный макет изделия уточняет принципиальные компоновочные решения проекта КА. Конструкторский электронный макет изделия, связанный с проектным, предназначен для формирования структуры изделия и комплекта конструкторской документации. Успешное применение технологии нисходящего проектирования невозможно без наличия библиотек 3D-моделей, некоторые из которых обладают интеллектуальными свойствами. Технология управления знаниями – одна из ключевых технологий, на которых базируется нисходящий подход. Внедрение принципов нисходящего проектирования может потребовать реинжиниринга бизнес-процессов предприятия. Решением может стать проектный подход к организации разработки изделия либо методика «ворота качества».

Ключевые слова: САПР, бизнес-процессы, нисходящее проектирование, управление жизненным циклом изделия, космический аппарат, конструирование, проектирование.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 423–429

TOP-DOWN APPROACH FOR SPACECRAFT DEVELOPMENT

M. V. Lihachev

JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Jeleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: max_kzk@catiaforum.ru

Top-Down product development in integrated 3D-CAD/PLM systems is a source of the significant advantages for aerospace enterprises. This approach allows to parallelize the development process and to effectively manage product changes. This approach is effective not only for 3D models of different phases of development, but also for product systems breakdown at initial phase. The top-down 3D model is an integrated part of enterprise product development data and processes. The author analyzed the current data model and business processes of an aerospace enterprise and proposed a new model, based on extensive use of PLM technology and top-down design approach. Spacecraft is a very specific product from a point of view of top-down approach and geometrical parameterization. The author considers the product 3D modeling process to be a part of product structure management. There are three phases of 3D model development. Wireframe 3D Functional scheme, linked with a spacecraft functional or logical scheme describes basic spacecraft layout and dimensions. Project digital mockup precise the spacecraft primary layout decisions at project development phase. Design digital mockup parametrically linked with a project mockup allows to produce technical drawings and a product structure. Successful application of a top down technique demands a support of system libraries, some of those containing intellectual 3D models. Knowledgeware is one of the keystone technologies incorporated

into top-down design process. Implementation of top-down approach may demand an enterprise business process reengineering. A project-oriented business model or a quality gate methodology may be a solution for this problem.

Keywords: CAD, PLM, business processes, top-down design, spacecraft, design, development.

Введение. Конкуренция среди разработчиков космических аппаратов (КА) накладывает все возрастающие требования к срокам разработки изделий. Одним из эффективных способов сокращения длительности этапов жизненного цикла изделия является внедрение методик параллельной разработки изделия с использованием современных САПР. Такие методики позволяют организовать параллельную работу коллектива разработчиков в трехмерной виртуальной среде, эффективное управление изменениями и повторным использованием данных.

На сегодняшний день на большинстве предприятий аэрокосмического комплекса проекты разработки КА выполняются в разрозненных САПР, без использования сквозных бизнес-процессов, ориентированных на реализацию преимуществ единого информационного пространства (ЕИП).

Соответственно, разработка и использование методики параллельного нисходящего проектирования космических аппаратов становится одной из наиболее актуальных задач развития служб конструкторско-технологической подготовки предприятия.

Цель данного исследования состоит в системном обосновании и разработке методики параллельного нисходящего проектирования космического аппарата.

В исследовании решаются следующие задачи:

– идентификация места методики нисходящего проектирования в модели данных и бизнес-процессов аэрокосмического предприятия;

– характеристика особенностей КА как объекта разработки;

– описание требований к методике;

– описание методики создания функциональной схемы КА;

– описание особенностей разработки проектного электронного макета изделия (ЭМИ);

– описание разработки конструкторского ЭМИ;

– разработка предложений по организации работ при реализации методики.

Место методики нисходящего проектирования в модели данных и бизнес-процессов аэрокосмического предприятия. Бизнес-процессы разработки КА являются частью бизнес-процессов предприятия и не могут быть рассмотрены в отрыве от других процессов, таких как процесс управления проектами, процесс технологической подготовки производства и др. Исходными данными для процесса проектирования являются требования к КА, сформулированные в виде технического задания. Процесс управления требованиями является частью процесса управления конфигурацией изделия и также может быть автоматизирован. Выходными документами процесса проектирования и входными для процесса конструирования являются теоретический чертеж КА, лимитная сводка масс, лимитная сводка энергопотребления, схема прохождения, схема деления изделия на составные части и пояснительная записка к проекту. Выходными данными процесса конструирования является комплект КД и конструкторских спецификаций на изделия.

На рис. 1 укрупненно представлена типичная модель бизнес-процесса разработки КА.

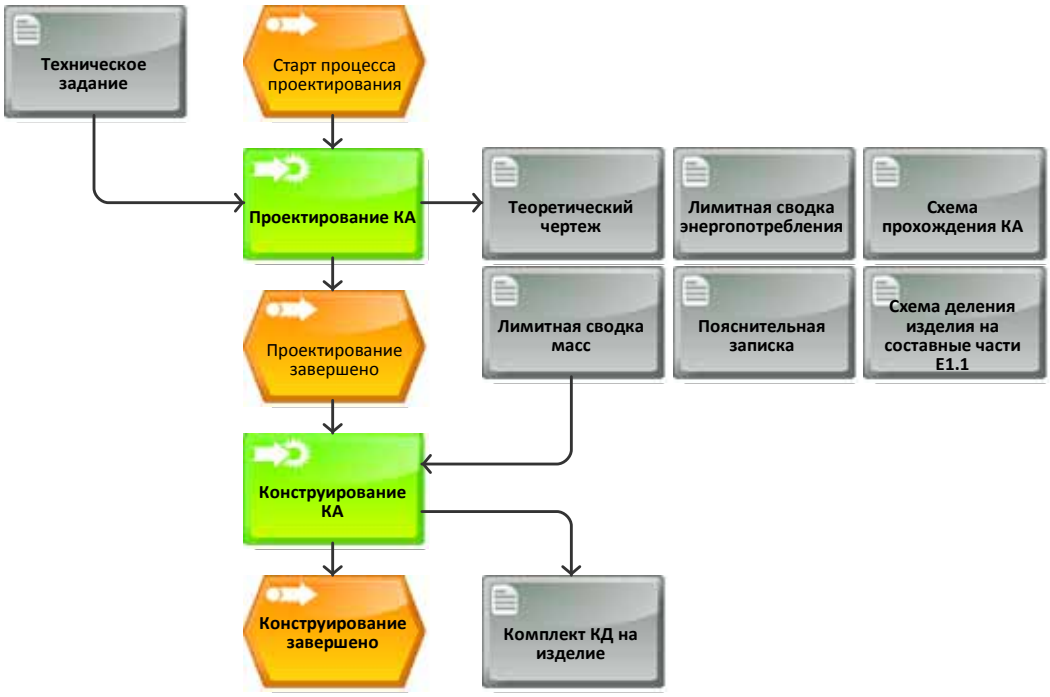


Рис. 1. Типичная модель бизнес-процесса разработки КА в нотации ARIS

Рассмотрим входы и выходы перечисленных процессов с точки зрения методологии PLM. Техническое задание в виде документа может быть заменено древовидной структурой требований в PLM-системе. [1]. Данный подход позволит обеспечить отслеживаемость требований для процессов сертификации изделия. Комплект конструкторской документации может существовать как в виде комплекта бумажных документов, так и в виде комплекта аннотированных 3D-моделей, полученных с использованием конструкторского ЭМИ и электронной структуры изделия (ЭСИ).

Схема деления изделия на составные части является по своей сути ЭСИ верхнего уровня. Лимитные сводки масс и энергопотребления – формы хранимого отчета по функциональной структуре изделия [2; 3] отчета. Схема прохождения является представлением технологического процесса сборки верхнего уровня, который можно сформировать на основе проектного ЭМИ в системе технологической подготовки производства класса DELMIA [4]. Наконец, теоретический чертеж – форма представления проектного ЭМИ. Необходимо отметить, что наибольшее ускорение процессов разработки, как и любых других, получается при полном отказе от бумажных документов и работе пользователей с 3D-моделями и метаданными. Однако несовершенство отечественного законодательства и консервативность ряда служб предприятия и заказчика могут препятствовать полному переходу к безбумажным процессам разработки [5]. В этой связи целью начального этапа внедрения PLM-системы может быть не полный отказ от бумажных документов, а их исключение из процессов обмена информацией между пользователями системы. Бумажный документ в качестве итогового отчета может формироваться автоматически и не замедляет существенно процессы разработки.

Таким образом, исходными данными для процесса проектирования будет являться иерархическая структура требований, а выходными – проектный ЭМИ, ЭСИ верхнего уровня и схема прохождения в виде техпроцесса DELMIA. Выходными данными процесса конструирования будут являться полный ЭМИ и полная ЭСИ.

Общепринятым подходом для формирования архитектуры систем и подсистем является методология системного инжиниринга. Для организации данных и процессов в PLM-системе предприятия в соответствии с данной методологией применяется модель данных RFLP (Requirement-Functional-Logical-Physical) [6], созданная с использованием принципов системной инженерии [7]. Современные системы управления жизненным циклом изделия, в частности платформа 3D-experience компании Dassault Systèmes, позволяют объединить структуру данных RFLP и элементы проектного ЭМИ в рамках единой модели. Такая модель может служить единой информационной средой разработки изделия для инженеров-системотехников и инженеров-механиков. Также появляется возможность подключения модели к встроенной или внешней системе оптимизации. Модель, объединяющая функциональную и физическую структуру изделия, называется функциональным цифровым макетом (FDMU) [8].

Предложенная автором модель данных и процессов PLM-системы показана на рис. 2.

Особенности КА как объекта разработки, требования к методике. Рассмотрим подробнее вопрос о структуре моделей, параметрических связей и процессов ЭМИ космического аппарата. Общие принципы построения параметрических моделей при нисходящем проектировании рассмотрены в статье [9].

С точки зрения моделирования в САПР в большинстве случаев компоновка изделия может быть сведена к плоскому эскизу или к их набору. Однако в силу высокой плотности компоновки космический аппарат не может быть представлен таким образом, и для выполнения компоновки необходимо оперировать трехмерными моделями приборов и механизмов.

Космические аппараты, даже относящиеся к одной платформе, отличаются большим разнообразием компоновок. Это затрудняет формализацию и повторное использование данных ЭМИ.

Система электрических соединений занимает существенный объем на изделии, и ее также желательно моделировать на этапе компоновки изделия.

Космический аппарат функционирует в двух состояниях: выведение и работа на орбите, что требует создания двух вариантов ЭМИ.

С учетом перечисленных требований и возможностей САРП CATIA V5/V6 предлагается трехступенчатая схема разработки ЭМИ: «функциональная схема – проектный ЭМИ – конструкторский ЭМИ».

Методика создания функциональной схемы КА. Функциональная схема изделия (ФСИ) – это набор геометрических элементов, моделирующих основные компоненты изделия. ФСИ предназначена для отработки базовых компоновочных решений КА. С точки зрения САПР ФСИ представляет собой деталь. При создании ФСИ целесообразно применение линейных и поверхностных геометрических элементов и нецелесообразно применение твердотельной геометрии. ФСИ полностью параметризована, причем параметрическая цепочка ФСИ должна начинаться от рабочих органов изделия. Для КА основными элементами функциональной схемы могут быть антенны с зонами обзора и другие компоненты КА, для функционирования которых критично пространственное положение и углы обзора. ФСИ также должна включать поверхность, описывающую максимальные габариты изделия (пространство под головным обтекателем). При создании ФСИ целесообразно широкое применение технологии Knowledge Based Engineering [10; 11].

Исходными данными для разработки ФСИ является функциональная структура КА.

Первым шагом разработки геометрической модели является создание главного скелетона КА. Главный скелетон содержит основные оси и габаритные размеры КА.

Каждому функциональному элементу КА может быть сопоставлен специальный объект CATIA типа User Defined Feature, представляющий собой набор геометрических элементов, связанных между собой параметрическим связями, а также набор правил и проверок CATIA Knowledge Advisor, определяющих внутреннюю логику поведения функционального элемента. Условимся называть такой объект интеллектуальным функциональным элементом (ИФЭ).

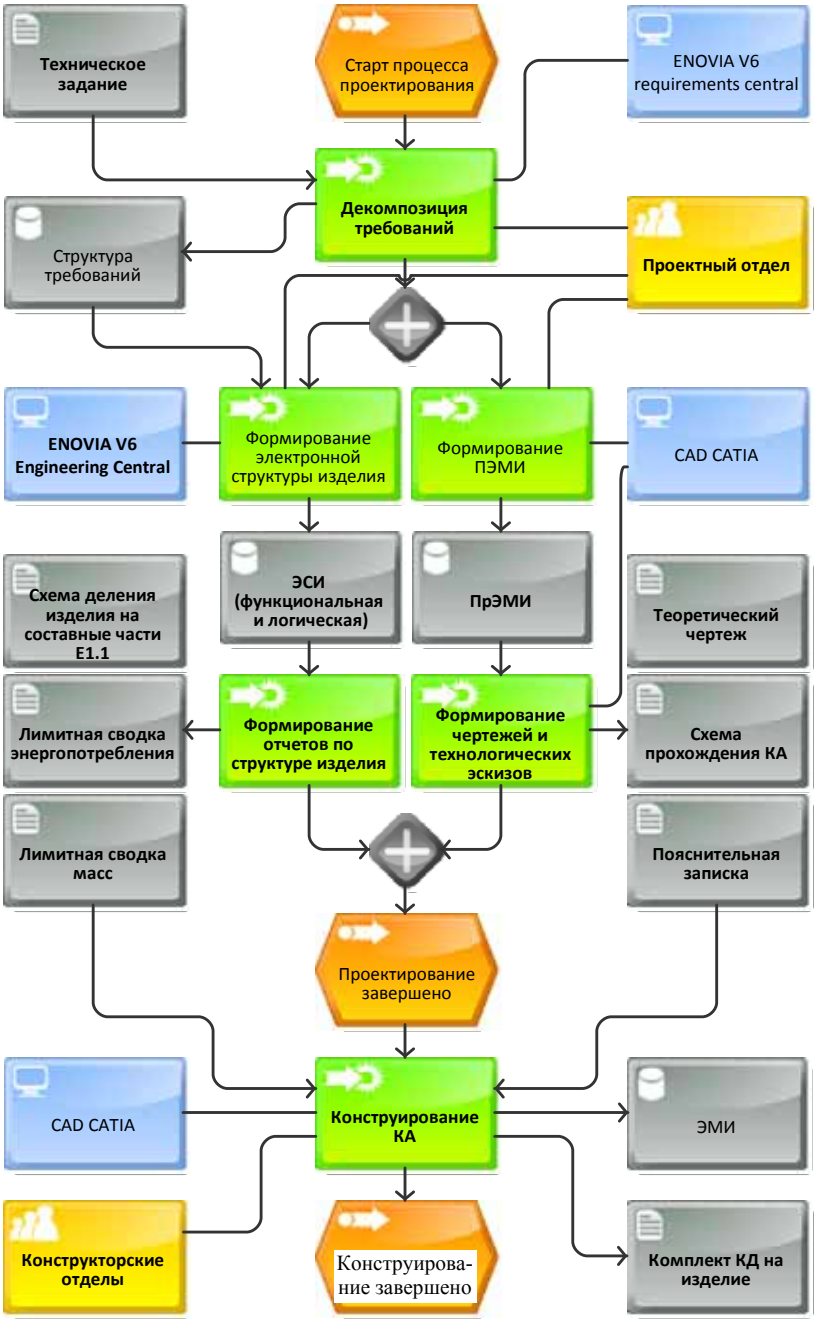


Рис. 2. Предложенная автором модель бизнес-процесса разработки КА в нотации ARIS

Геометрически ИФЭ привязываются к скелетону и друг к другу. Взаимодействие функциональных элементов между собой и с главным скелетоном КА задается геометрической параметризацией, а также правилами и проверками CATIA Knowledge Advisor или Knowledge Expert.

Как главный скелетон КА, так и шаблоны ИФЭ могут быть типизованы и занесены в библиотеку. Таким образом, создание ФСИ сводится к выбору из библиотеки или созданию главного скелетона КА и вставке из библиотек или созданию ИФЭ для функциональных элементов (рис. 3, 4).

В предложенной схеме ФСИ позволяет разработчикам за короткое время проработать большое количество вариантов компоновки КА.

Разработка проектного ЭМИ. Разработка ЭМИ регламентируется стандартом [12]. Проектный ЭМИ (ПрЭМИ) разрабатывается на втором этапе компоновки КА на основе ФСИ. В отличие от ФСИ ПрЭМИ содержит элементы твердотельной геометрии. Эти элементы могут как вставляться из библиотек, так и создаваться вручную.

С точки зрения САПР ПрЭМИ является сборкой, включающей в себя ФСИ и набор деталей, описывающих твердотельные элементы КА. При этом новые детали создаются в контексте сборки, с привязкой к ФСИ, а заимствованные и библиотечные – позиционируются в сборке геометрическими ограничениями по отношению к ФСИ. Структура ФСИ одноуровневая. Все элементы ПрЭМИ, за исключением заимствованных,

разрабатываются в общей системе координат КА. ФСИ и ПрЭМИ разрабатываются, как правило, одним сотрудником. На рис. 4 показан проектный ЭМИ для малого КА.

ПрЭМИ является трехмерным аналогом теоретического чертежа КА. Также на основе ПрЭМИ разрабатывается схема прохождения и схема деления КА на составные части. Необходимо отметить, что провести грань между процессами разработки ФСИ и ПРЭМИ достаточно сложно, поскольку не все компоновочные решения могут приниматься только на основе ФСИ.

Таким образом, в терминах исследования [9] ПрЭМИ выполняет функции сборки скелетонов и обеспечивает передачу изменений от ФСИ к КЭМИ и распараллеливание работ.

Разработка конструкторского ЭМИ. Основное назначение конструкторского ЭМИ (КЭМИ) – разработка конструкции и получение чертежей. Структура КЭМИ соответствует структуре «Схемы деления КА на составные части». Каждый элемент структуры КЭМИ (конструкторская сборка (КС)) может разрабатываться отдельным конструктором параллельно. Исходными данными для каждой конструкторской сборки является соответствующая деталь ПрЭМИ. В КС деталь ПрЭМИ выполняет функцию скелетона, и все детали и сборочные единицы КС создаются с привязкой к ней, в контексте сборки КС, что наглядно представлено на рис. 5.

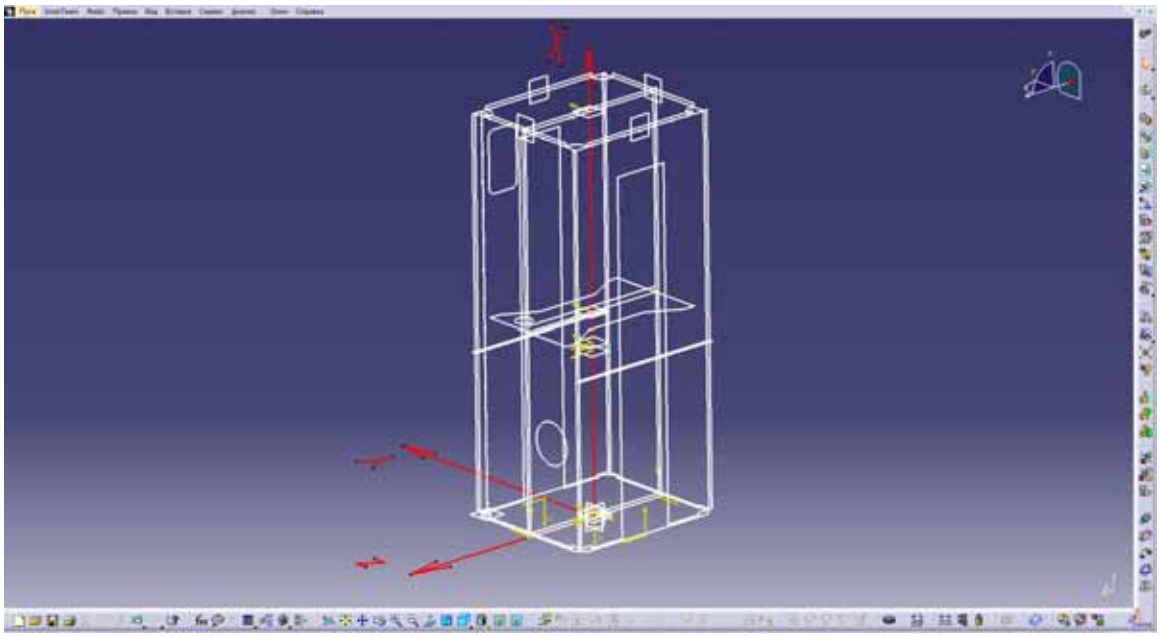


Рис. 3. Пример ФСИ для малого КА

Рис. 4. Пример ПрЭМИ для малого КА

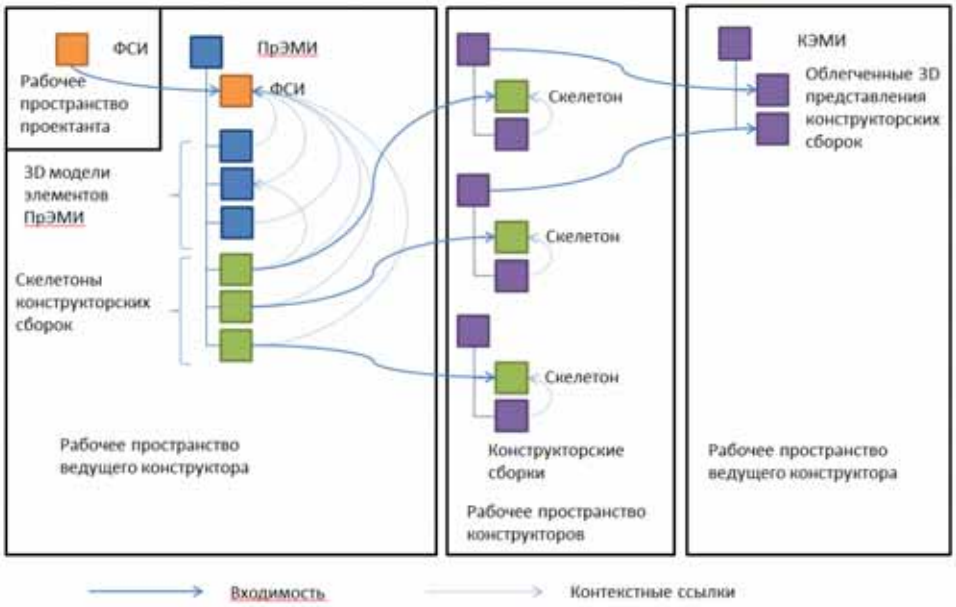


Рис. 5. Схема сквозной параметризации ФСИ–ПрЭМИ–КЭМИ

Структура КЭМИ по возможности максимально соответствует структуре изделия.

Этапы разработки ЭМИ. Предложения по организации работ при реализации методики. Предложенная модель данных и процессов обладает целым рядом преимуществ, однако ее использование в рамках традиционной, функциональной, структуры предприятия актуализирует некоторые противоречия.

Поскольку методика обеспечивает полную нисходящую параметризацию по цепочке ФСИ–ПрЭМИ–КЭМИ, возникают вопросы о регламентации внесения изменений в данные объекты. Технически, современные САПР позволяют заблокировать передачу изменений по параметрическим связям на определенных этапах жизненного цикла. Однако практика показывает, что необходимость в проведении изменений по всей цепочке может возникать на любом из этапов.

Традиционно ФСИ и ПрЭМИ разрабатываются в проектном подразделении, а КЭМИ – в конструкторском. Поскольку ПрЭМИ и КЭМИ могут разрабатываться параллельно, при отсутствии четких критериев перехода от фазы проектирования к фазе конструирования возможен конфликт интересов между данными функциональными подразделениями.

Наилучшим решением возникших противоречий был бы переход к проектной структуре организации работ либо к структуре типа «легкая матрица» [13]. Однако на практике это не всегда возможно.

Другим решением может стать переход к управлению разработкой по принципу «ворот качества» [14; 15] со стандартизованными требованиями к прохождению «ворот».

Заключение. Таким образом, основными преимуществами предложенной методики параллельного нисходящего проектирования КА модели данных и процессов являются:

– сквозная параметризация моделей и чертежей;

– возможность групповой работы конструкторов в среде электронного макета изделия;

– возможность широкого повторного использования данных;

– возможность перекрытия стадий жизненного цикла изделия.

Для практического внедрения данной модели может потребоваться дифференцированный по глубине реинжиниринг бизнес-процессов предприятия.

Библиографические ссылки

1. Лихачев М. В. Методика управления требованиями как часть управления структурой изделия // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. (7–9 нояб. 2012, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 76–77.

2. Лихачев М. В. Управление структурой изделия в PLM-системах // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. (11–14 нояб. 2014, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. Ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 262–264.

3. ГОСТ 2.053–2006. ЕСКД. Электронная структура изделия. Общие положения. [Электронный ресурс]. URL: http://gostexpert.ru/gost/gost-2.053-2006 (дата обращения: 19.09.2014).

4. Голдовский А., Голдовский П., Федотов О. Система DELMIA как решение для моделирования производственной деятельности [Электронный ресурс] // CAD/CAM/CAE Observer. 2005. № 1(19). URL. http://www.cadcamcae.lv/hot/delmia_n19_p13.htm (дата обращения: 07.10.2014).

5. Пичев С. В., Судов Е. В. От бумажных конструкторских документов – к электронным. А дальше? [Электронный ресурс] // Технологии PLM и ИЛП. Вып. 3. URL: http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/emag_3_sudov_pitchev.pdf (дата обращения: 18.08.2014).

6. Крысенков Д. В. RFLP – современный подход к проектированию высокотехнологичных продуктов [Электронный ресурс] // CAD/CAM/CAE Observer.

2010. № 5 (57). URL: http://www.cadcamcae.lv/hot/DS_RFLP_n57_p29.pdf (дата обращения: 07.10.2014).

7. Холл А. Опыт методологии для системотехники. М. : Советское радио, 1975. 449 с.

8. Лихачев М. В., Шангина Е. А. Применение технологии функционального цифрового макета изделия на этапе предконтрактного проектирования космического аппарата // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. науч. конф. (12–14 нояб. 2013, г. Красноярск) : в 2 ч. Ч. 2 / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 24–26.

9. Лихачев М. В. Некоторые вопросы технологии трехмерного нисходящего проектирования сложных изделий машиностроения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2013. № 2 (150). С. 22–27.

10. Ушаков Д. Интеллектуализация программных решений в области PLM: стратегия компании «Ледас» // Preprint. 2004. 12. Новосибирск : Ledas LTD. 36 с.

11. Голдовский П., Бубнов А. Knowledgeware: как задействовать самые ценные корпоративные архивы [Электронный ресурс] // САПР и графика. 2001. № 4. URL: http://www.hetnet.ru/wcmfiles/article_101.pdf (дата обращения: 07.10.2014).

12. ГОСТ 2.052–2006. ЕСКД. Электронная модель изделия. Общие положения [Электронный ресурс]. URL: http://vsegost.com/Catalog/78/784.shtml (дата обращения: 19.09.2014).

13. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Информационные технологии в проектировании и производстве. СПб. : Политехника, 2008. 304 с.

14. Лихачев М. В., Шангина Е. А. Применение технологии управления проектами в системах управления жизненным циклом изделий // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. (7–9 нояб. 2012, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 793–794.

15. Зильбербург Л. И., Яблочников Е. И., Молочник В. И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении. СПб. : Политехника, 2004. 150 с.

References

1. Likhachev M. V. [Requirement Managemant Technique as a part of product structure management]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* [Mat. XVIth Int. Scientific Conf. “Reshetnev readings”], Krasnoyarsk, 2012, P. 76–77 (In Russ.).

2. Likhachev M. V. [Product structure management in PLM Systems]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* [Mat. XVIIIth Int. Scientific Conf. “Reshetnev readings”], Krasnoyarsk, 2014, P. 262–264 (In Russ.).

3. *GOST 2.053–2006. ESKD. Elektronnaya struktura izdeliya. Obshchie polozheniya.* [State Standart 2.053–2006. Unified system for design documentation. Product electronic structure. General.] Available at: http:// gostexpert.ru/gost/gost-2.053-2006 (accessed 19.09.2014).

4. Goldovskiy A., Goldovskiy P., Fedotov O. [DELMIA system – solution for manufacturing modeling]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2005, No. 1 (19). Available at: http://www.cadcamcae.lv/hot/delmia_n19_p13.htm (accessed 07.10.2014).

5. Pichev S. V., Sudov E. V. [From paper engineering documents to electronic and beyond]. *Tekhnologii PLM i ILP*. Vol. 3. (In Russ.). Available at: http://cals.ru/sites/default/files/downloads/emagazine/emag_3_sudov_pitchev.pdf (accessed 18.08.2014).

6. Krysenkov D. V. [RFLP – modern approach to hi-tech product development]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2010, No. 5 (57). Available at: http://www. cadcamcae.lv/hot/DS_RFLP_n57_p29.pdf (accessed 07.10.2014).

7. Holl A. *Opyt metodologii dlya sistemotekhniki* [A methodology for systems engineering]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1975, 449 p.

8. Likhachev M. V., Shangina E. A. [Functional digital mockup technology application for spacecraft precontractual development]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* [Mat. XVIIth Int. Scientific Conf. “Reshetnev readings”], Krasnoyarsk, 2013, Part 2, P. 24–26 (In Russ.).

9. Likhachev M. V. [Some issues of top-down 3D-CAD design approach for complex mechanical products]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve.* 2013, Vol. 150, No. 2, P. 22–27 (In Russ.).

10. Ushakov D. *Intellektualizatsiya programmnykh resheniy v oblasti PLM: Strategiya kompanii Ledas. Novosibirsk* [Adding intelligence to software solutions for PLM: New LEDAS approach]. Novosibirsk, Preprint 12 Publ., 2004, 36 p.

11. Goldovskiy P., Bubnov A. [Knowledgeware: How to set in motion the enterprise knowledge]. *SAPR i grafika*, 2001, No. 4. Available at: http://www. hetnet.ru/wcmfiles/article_101.pdf (accessed 07.10.2014).

12. *GOST 2.052-2006. EKSD. Elektronnaya model' izdeliya. Obshchie polozheniya.* [State Standard 2.052–2006. Unified system for design documentation. Electronic model of product. General principles.] Available at: http://vsegost.com/Catalog/78/784.shtml (accessed 19.09.2014).

13. Zilberburg L. I., Molochnik V. I., Yablochnikov E. I. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*. [Information technologies of product development and production]. St.Petersburg, Politekhnika Publ., 2008, 304 p.

14. Lihachev M. V., Shangina E. A. [Project management methodology implementation in product data management systems]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* [Mat. XVIth Int. Scientific Conf. “Reshetnev readings”]. Krasnoyarsk, 2012, P. 793–794 (In Russ.).

15. Zilberburg L. I., Molochnik V. I., Yablochnikov E. I. *Reinzhiniring i avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroenii* [Product development automatization and reengineering]. St.Petersburg, Politekhnika Publ., 2004, 150 p.

© Лихачев М. В., 2015

УДК 629.78.05.017.1

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 430–437

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. А. Тестоедов, В. В. Двирный, Е. А. Морозов, Г. В. Двирный, Н. В. Еременко*

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: erko@iss-reshetnev.ru

Требования к долговечности бортовых приборов определяются особенностями их работы в составе мощных телекоммуникационных космических аппаратов (КА). Срок активного существования космических аппаратов – до 15 лет, мощность – до 15 кВт, десятки транспондеров в C-, Ku-, Ka- и L-диапазонах частот приводят к необходимости разработки и наземной экспериментальной отработки (НЭО) большого количества теплонагруженных приборов КА. Для сужения температурного диапазона работы бортовых приборов очень важно принять правильную концепцию проектного облика системы терморегулирования (СТР) КА. Приведен пример основных положений концепции СТР теплонагруженного КА. Для повышения долговечности бортовых приборов КА необходимо обеспечить качественную кондуктивную связь приборов с приборными панелями или обшивками приборных панелей КА, на которые они установлены. Тепловые анализы для бортовых приборов необходимо выполнять при различных режимах работы оборудования, например, методом конечных элементов, реализованном в приложении COSMOS для программы SolidWorks. Для обеспечения длительного срока работы электрорадиоизделий бортовых приборов теплонагруженных КА необходимо обеспечить коэффициент токовой нагрузки 30…50 %. Рассмотрены «горячий» и «холодный» расчетные случаи температуры посадочных мест бортовых приборов, при этом температура электрорадиоизделий составила от –10 до +40 °С. Надежность напрямую связана с долговечностью бортовых приборов, которая, в свою очередь, зависит от протекающих в конструкциях термопрочностных процессов. Дан анализ теоретических исследований. Результаты теоретических исследований термопрочностных процессов бортовых приборов подтверждены результатами НЭО и положительными результатами эксплуатации мощных телекоммуникационных космических аппаратов «Экспресс-АМ5» и «Экспресс-АМ6». Приведены результаты прецизионных измерений в термовакуумных условиях типичной платы бортового прибора разработки и производства АО «ИСС» в диапазоне температур от –100 до +100 °С.

Ключевые слова: долговечность приборов космического аппарата, наземная экспериментальная отработка, теплонагруженные приборы, система терморегулирования, термопрочность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 430–437

EXTENDING THE LIFE OF SATELLITE ON-BOARD UNITS

N. A. Testoedov, V. V. Dvirnyi, E. A. Morozov, G. V. Dvirnyi, N. V. Eremenko*

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

When units operate on-board of a high capable telecommunication satellite (SC), their life shall expectancy be enhanced. 15-year lifetime, 15kW power, tenths of transponders in C-, Ku-, Ka- and L-bands on-board a spacecraft stipulate the need to develop and to perform a ground development testing on a large amount of thermally stressed on-board units. To be able to reduce on-board units operating temperature ranges it is very important to implement a correct approach in SC thermal control subsystem (TCS) design; an example of main concepts of TCS design for a thermally stressed SC is provided. With the purpose to extend the life of SC on-board units it is necessary to ensure effective conductive paths between the units and the SC panels or SC panels skins where the units are installed. Thermal analyses for on-board units shall be performed considering different modes of units operation, using, for example, a finite-element method, available in COSMOS application of SolidWorks. To ensure long operating life of unit EEE parts used on thermally stressed SC derating of 30…50 % shall be provided. Hot and cold cases of on-board unit baseplate temperatures are being reviewed; the calculation gives the temperatures from minus 10 to plus 40 °C for EEE parts. On-board units’ reliability directly depends on their life expectancy, which, in its turn, depends on the thermal resistance processes occurring within them. A review of theoretical estimation has been provided. The results of the calculations

performed for on-board units correlate well with the results of the ground tests and are validated by the results of successful operation of powerful communications satellites such as Express-AM5 and Express-AM6. The paper demonstrates the results of accurate measurements in the temperature range from minus 100 to plus 100 °C done under thermal vacuum for a typical printed circuit board used within an onboard unit designed and manufactured by JSC ISS.

Keywords: on-board units extended life expectancy, ground testing, thermally stressed units, thermal control subsystem, thermal strength.

Введение. Современное состояние космических средств связи характеризуется потребностью в мощных телекоммуникационных КА. Так, 26 декабря 2013 г. осуществлен запуск российского спутника «Экспресс-АМ5» разработки и изготовления АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (АО «ИСС») с 84 транспондерами *C*-, *Ku*-, *Ka*- и *L*-диапазонов. В качестве модуля служебных систем на КА «Экспресс-АМ5» впервые применена унифицированная негерметичная платформа «Экспресс-2000» мощностью порядка 15 кВт [1]. На базе той же платформы собственной разработки 21 октября 2014 г. выведен на орбиту КА «Экспресс-АМ6», созданный в АО «ИСС», полезная нагрузка которого составила 72 транспондера и 11 антенн, работающих в диапазонах частот *C*, *Ku*, *Ka* и *L* [2]. Новый спутник для российской орбитальной группировки «Экспресс-АМ8» на срок активного существования (САС) 15 лет, имеющий 42 транспондера в диапазонах частот *C*, *Ku*, *Ka*, 2 марта 2015 г. доставлен самолетом АН-124-100 «Руслан» на космодром Байконур для подготовки к запуску [3].

Актуальность проблемы улучшения долговечности и надежности бортовой аппаратуры. Тенденции развития космической отрасли были обсуждены на XIX ежегодной конференции операторов и пользователей сети спутниковой связи и вещания в России SatComRus в начале октября 2014 г., где в качестве основных трендов и перспектив развития участники уделили внимание ресурсам мощных телекоммуникационных КА типа «Экспресс» разработки и производства АО «ИСС» [2].

Требования повышенной энерговооруженности и САС до 15 лет в вышеперечисленных КА делают актуальной проблему повышения долговечности и надежности различной бортовой электронной аппаратуры.

Средства обеспечения улучшения долговечности бортовой аппаратуры. В АО «ИСС» такой положительный опыт имеется, например, при создании КА SESAT [4]. Благодаря примененной активной газожидкостной системе, обеспечившей для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) температуру теплоносителя на выходе из радиатора в узком температурном диапазоне (27 ± 1 °С), были созданы комфортные условия, которые совместно с другими техническими решениями обеспечили к настоящему времени полуторный САС КА SESAT (15 лет).

По результатам исследования профессора Г. Н. Дульнева, сужение температурного диапазона работы радиоэлектронных устройств на 10 °С уменьшает интенсивность их отказов на 25 % [5].

Состав системы терморегулирования для геостационарных КА. Для обеспечения улучшения долговечности бортовой аппаратуры важно принять правильную концепцию проектного облика СТР КА, например на следующих принципах, для геостационарного КА модульного исполнения:

1. Использование в качестве основных радиаторов СТР КА наружной поверхности сотовых приборных панелей полезной нагрузки (ПН) и платформы, расположенных на северной и южной панелях и покрытых высокоэффективным терморегулирующим покрытием ОСО-С на ПН и на платформе для обеспечения в течение заданного САС в периоды солнцестояний отвода тепловой мощности от оборудования ПН, включая теплопритоки от антенной подсистемы, на начало САС и на конец САС от оборудования платформы.

2. Использование автономных радиаторов СТР для терморегулирования аккумуляторных батарей (АБ) и обеспечения отвода тепловой мощности от АБ в периоды солнцестояний и в периоды прохождения теневых участков Земли и для терморегулирования двигательных блоков ориентации и стабилизации КА.

3. Применение тепловых труб (ТТ), встроенных в северную и южную панели ПН и платформы. ТТ обеспечивают отвод тепла от оборудования ретранслятора (РТР) и платформы, отвод тепла от теплообменных участков жидкостного контура (ЖК), равномерное распределение тепла по серверной и южной панелям КА для обеспечения требуемого теплоотвода в космическое пространство.

4. Применение ЖК на серверной и южной панелях ПН, встраиваемого в панели платформы, который обеспечивает отвод избыточного тепла от оборудования, расположенного на панели контрольно-измерительной системы (КИС) и астроплате, и частично от оборудования ПН, перенос избыточного теплового потока между серверной и южной панелями ПН, сужение диапазона регулирования температуры оборудования КА.

На рис. 1 показан пример расположения радиоэлектронного прибора КА.

Важным моментом является кондуктивная связь тепловыделяющего оборудования с приборными панелями или обшивками приборных панелей, например, за счет использования теплопроводящих заполнителей.

При этом существует проблема сплошности заполнения и контроля сплошности, поскольку незаполненные места контакта иногда наблюдаются при отстыковке приборов для замены по результатам наземных испытаний.

Тепловой анализ как средство оценки тепловой нагруженности бортовой аппаратуры. Тепловые анализы приборов выполняют при различных режимах работы оборудования [6]. Пример теплового анализа конструкции прибора приведен в работе [7].

Для обеспечения длительного срока работы электрорадиоизделий (ЭРИ) бортовых приборов (БП) теп-

лонагруженных КА необходимо провести тщательный анализ их токовой нагрузки и обеспечить коэффициент нагрузки, равный отношению рабочего тока к максимально допустимому не более 30…50 %.

Для проведения тепловых анализов БП рассмотрим типичную конструкцию, которая представляет собой металлическую рамку с приклеенными к ней с двух сторон многослойными печатными платами (МПП). Рамка выполнена из алюминиевой плиты, например, из сплава АМг6Б размером 231×174 мм, шириной от 15 до 35 мм. Толщина основания рамки – 1 мм; толщина стенок – 2…7 мм. Имеются крышки толщиной 1 мм и кронштейны толщиной 2…5 мм.

МПП выполнены из стеклотекстолита с экранами из медной фольги. Суммарная толщина каждой платы – 0,9 мм. МПП крепится к рамке специальной клеевой пленкой. На МПП производится монтаж электрорадиоизделий.

БП, например, состоит из 20 рамок с МПП и имеет геометрические характеристики 174×340×397 мм.

Для проведения анализа стационарного теплового режима БП использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в приложении COSMOS для программы Solid Works.

Программа COSMOS использовалась:

– для создания трехмерной геометрической модели;

– задания теплофизических свойств материалов конструкции;

– генерирования конечно-элементной сетки;

– задания тепловых граничных условий;

– вывода результатов расчета в графическом виде.

Расчетная тепловая модель включает модели рамок и кронштейнов.

Конечно-элементная модель БП представлена на рис. 2. Теплофизические характеристики материалов приведены в табл. 1. Тепловыделение ЭРИ задавалось равномерно на местах установки ЭРИ. Тепловыделение в БП задавалось равномерно распределенным по поверхности рамок.

На контактных поверхностях БП задавалась постоянная температура 40,1 °С, с учетом термического сопротивления заполнителя контакта между БП и его посадочной поверхностью.

В тепловом анализе рассмотрены «горячий» расчетный случай при максимальной гарантированной температуре посадочного места БП +40 °С и «холодный» расчетный случай при минимальной гарантированной температуре посадочного места БП –10 °С и отсутствии тепловыделения в приборе. В этом случае температура ЭРИ составит не ниже –10 °С.

Теплоотвод от ЭРИ осуществляется за счет теплопроводности от корпуса элемента через клеевые соединения, подставки, прокладки на основание, а также по выводам элемента через проводники печатной платы на основание.

Конструктивные параметры установки тепловыделяющих ЭРИ характеризуются теплонагруженностью, количеством выводов и их длиной, контактной площадью с материалом. Общая расчетная схема ЭРИ приведена на рис. 3.

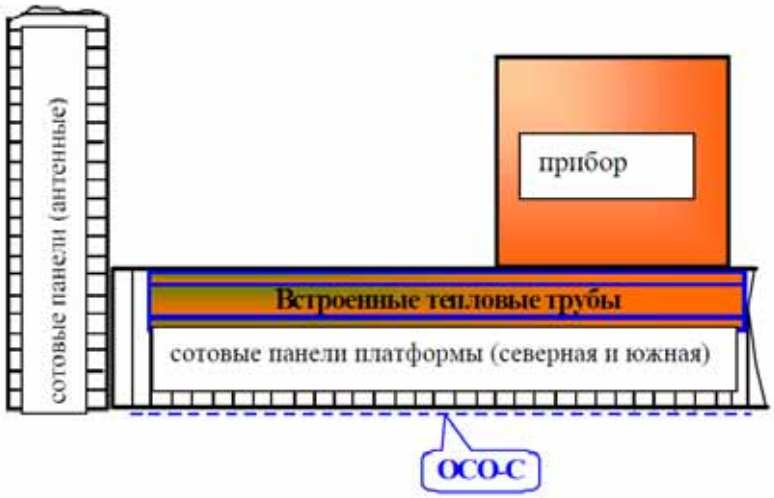


Рис. 1. Размещение прибора на северной и южной панелях платформы

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов

Элемент конструкции	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Кронштейны	АМг6Б	117
Рамки блоков	АМг6Б	117
Плата	Стеклотекстолит + медные экраны	0,3
Выводы ЭРИ	Оловянистая бронза	84
Клеи, пасты	Эластосил 137-182	1,5
	У-9М	0,3
	ПКС-171	1

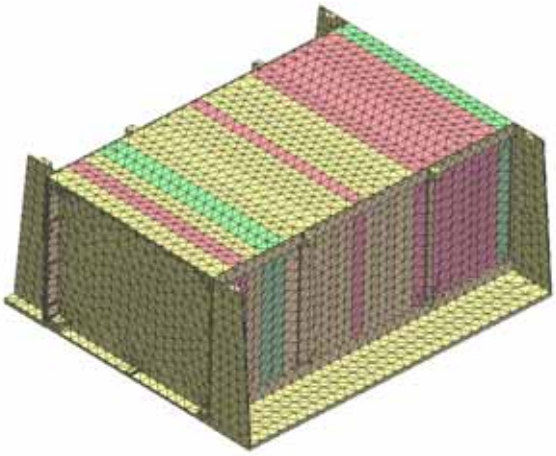
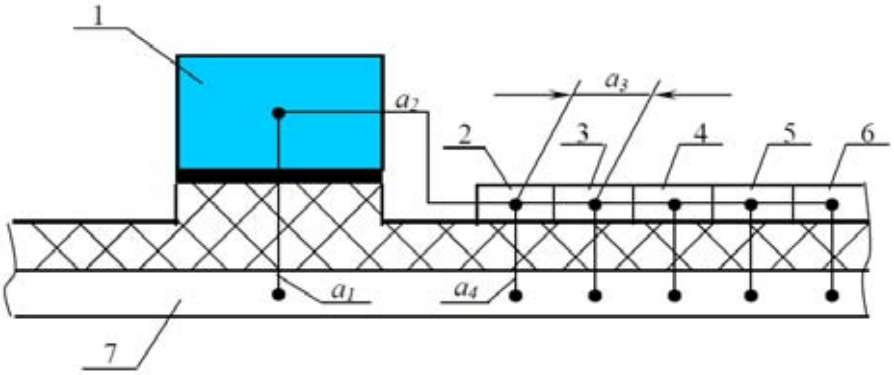


Рис. 2. Конечно-элементная модель БП



1 – ЭРИ; 2-6 – расчетные узлы проводника печатной платы; 7 – рамка блока.

Тепловые проводимости:

a_1 – между ЭРИ и рамкой блока через клей и текстолит;

a_2 – между ЭРИ и проводником печатной платы по выводам ЭРИ;

a_3 – между расчетными узлами проводника печатной платы;

a_4 – между расчетными узлами проводника печатной платы и рамкой блока.

Рис. 3. Расчетная схема ЭРИ

Для проведения теплового расчета проводник печатной платы и стеклотекстолит разбиты по длине на участки, например по 5 мм.

На тепловыделяющих ЭРИ учитываются значения тепловых проводимостей a_i, тепловыделения ЭРИ, температура рамок в местах установки ЭРИ, перепады температуры ЭРИ относительно рамки.

Принимается допущение, что максимальные температуры ЭРИ, в которых рассеиваемая мощность отсутствует или незначительна, равны максимальным температурам конструкции прибора в местах установки ЭРИ.

Результат теплового анализа. Результаты расчета конструкции прибора показали, что температура посадочных мест БП находится в заданных пределах (от –10 до +40 °С). Расчеты показали, что температура ЭРИ БП находится в допустимых пределах.

Влияние напряженно-деформируемых состояний на бортовые приборы. Надежность напрямую связана с долговечностью, которая, в свою очередь, зависит от протекающих в конструкциях БП термопрочностных процессов в экстремальных условиях орбитального полета. Циклические напряженно-деформируемые состояния приводят к усталостным изменениям в таких элементах конструкции, как проводники, металлизированные переходные отверстия, паяные и клеевые соединения, выводы и корпуса компонентов, полупроводниковые кристаллы, платы и подложки, что может привести к механическим и электрическим разрушениям и отказу после длительной эксплуатации [8].

Разрушение от усталости имеет ряд особенностей [9]:

– разрушение происходит при напряжениях, меньших предела текучести или временного сопротивления;

– разрушение начинается на поверхности локально, в местах концентрации напряжений. Локальные концентрации напряжений создают повреждения поверхности в результате циклического нагружения поверхности. В результате циклического нагружения концентрация напряжений возникает также из-за дефектов в виде следов обработки, воздействия среды;

– разрушение протекает в несколько стадий, характеризующих процессы накопления повреждений в материале, образование трещин усталости, постепенное развитие и слияние некоторых из них в одну магистральную трещину и быстрое окончательное разрушение;

– разрушение имеет характерное строение излома, отражающее последовательность процессов усталости. Излом состоит из очага разрушения (места образования микротрещин) и двух зон – усталости и долома.

Напряженное и деформированное состояние обычно можно изучить с большей точностью, чем провести оценку опасности этих состояний. Другими словами, из двух основных этапов оценки прочности – установления напряженного и деформированного состояния, а также соответствующих температурных полей и оценки опасности, т. е. собственно расчета на прочность, второй менее изучен, о чем свидетельствуют работа [10], в которой приведены результаты расчетов на термическую усталость, работа [11] – расчеты на термическую устойчивость, работа [12] – расчеты на ползучесть. Для анализа напряженно-деформированного состояния элементов сложных теплонапряженных конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) КА, в которых применены материалы с зависящими от температуры физическими характеристиками, в последнее время все чаще применяются не аналитические [13–18], а более универсальные и гибкие численные методы. Кроме анализа работоспособности теплонапряженных конструкций при анализе неупругого поведения конструкций часто используют численные методы решения задач термоупругости. Такой анализ можно проводить последовательными приближениями или последовательными этапами нагружения, например, методом конечностных разностей (МКР) [15; 16; 19], при котором дифференциальное уравнение заменяется системой алгебраических уравнений (разностным уравнением).

Экспериментальные исследования. Результаты теоретических исследований расчетов подтверждаются в процессе НЭО. Основными понятиями, определяемыми при экспериментальных исследованиях, являются относительные деформации плат в различных точках. Для плат предложено нанести две взаимно перпендикулярные полосы вдоль и поперек с установкой меток по краям, и в термовакуумных условиях провести прецизионные измерения перемещения меток при различных температурах. Затем при многократном увеличении на микроскопе исследовать величину микротрещин, которые принять за допустимые деформации. Точность прецизионных измерений должна быть не хуже 1/3 величины трещины.

Предложенный метод является усовершенствованием применения известных методов хрупких тензочувствительных покрытий. Можно также использовать методы, основанные на применении оптических чувствительных покрытий, которые, однако, не позволяют измерить линейные перемещения с требуемой точностью, особенно при большом количестве контролируемых точек.

Во избежание монтажных напряжений при крайних температурах важен геометрический контроль посадочных мест под БП, как, например, показано на рис. 4 [20].

В табл. 2, на рис. 5, 6 приведены результаты испытаний типичной платы БП в термовакуумных условиях, где X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2 – координаты измеренных точек P1–P4; begin – начальное положение точек, end – конечное положение точек, delta – разница между конечным и начальным положением. На рис. 7 показана установка платы БП при проведении термовакуумных испытаний.

Рис. 4. Геометрический контроль базовой панели модуля полезной нагрузки мощного телекоммуникационного КА разработки и производства АО «ИСС» системой КИМ G-90 CS 45.20.12 (оптико-механический метод измерения)

Таблица 2

Результаты испытаний платы БП в термовакуумных условиях

Name	Begin			End			Delta			
НУ1-+100	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	dX	dY	dZ	Magnitude
P1	72,00	85,80	–0,09	72,07	85,88	–0,08	0,07	0,08	0,00	0,11
P2	55,24	–98,66	0,09	55,30	–98,75	0,09	0,06	–0,09	0,00	0,11
P3	–69,52	–89,41	–0,09	–69,60	–89,50	–0,08	–0,07	–0,09	0,00	0,12
P4	–57,72	102,27	0,08	–57,77	102,37	0,08	–0,05	0,10	0,00	0,12
Name	Begin			End			Delta			
НУ1--100	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	dX	dY	dZ	Magnitude
P1	72,00	85,80	–0,09	72,10	85,95	–0,08	0,10	0,14	0,01	0,17
P2	55,24	–98,66	0,09	55,33	–98,83	0,09	0,09	–0,16	–0,01	0,19
P3	–69,52	–89,41	–0,09	–69,63	–89,57	–0,08	–0,11	–0,16	0,01	0,19
P4	–57,72	102,27	0,08	–57,79	102,45	0,08	–0,08	0,18	–0,01	0,19

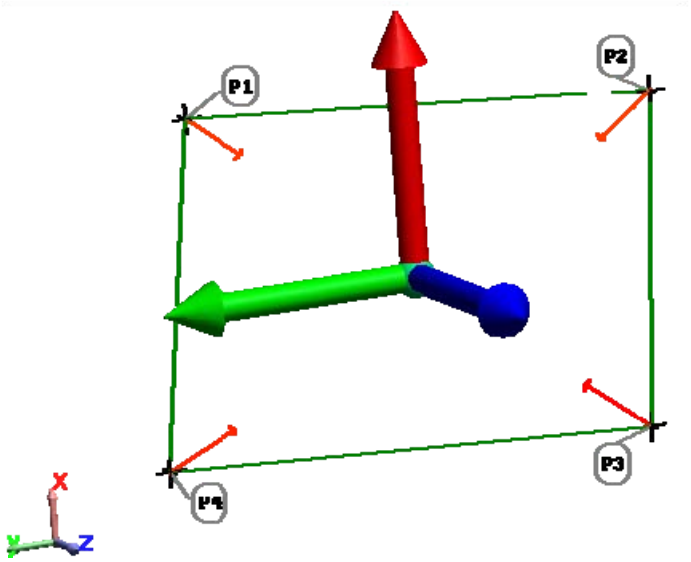


Рис. 5. График отклонения точек при режиме «плюс 100 и вакуум»

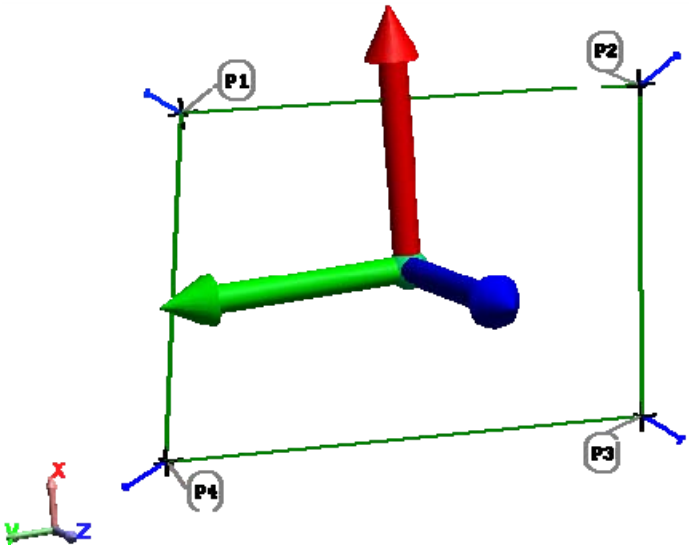


Рис. 6. График отклонения точек при режиме «минус 100 и вакуум»

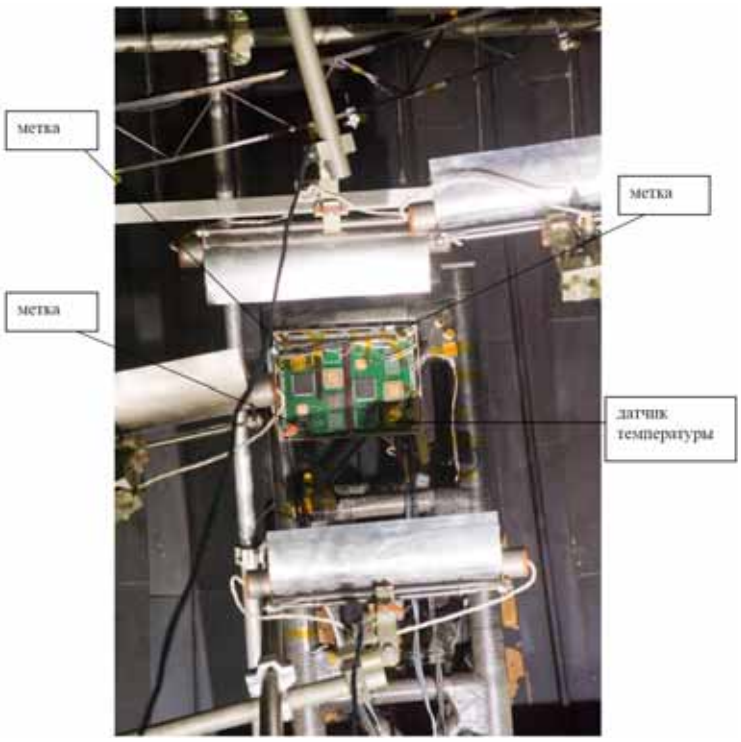


Рис. 7. Плата БП на термовакуумных испытаниях

Результаты измерений показывают, что максимальные магнитуды при максимальных крайних температурах –100 и +100 °С лежат в пределах от 0,278 до 0,290, и от 0,173 до 0,192 соответственно. Можно сделать вывод о том, что результаты тепловых анализов подтверждаются данными измерений, проведенными во время наземно-экспериментальной отработки.

Заключение. Снижение нагрузок на комплектующие (от 30 до 50 %) позволяет увеличить долговечность бортовых приборов. Снижение нагрузок – практический способ сокращения отказов и увеличения надежности как на уровне комплектующих и приборов, так и на уровне КА в целом. Сужение температурного диапазона работы бортовых приборов, при правильном построении СТР КА, обеспечении кондуктивного обмена между БП и панелями КА и отвода тепла с панелей, подтвержденном тепловыми анализами, обеспечит увеличение долговечности БП современных высокоэнероговооруженных КА, подверженных воздействию термоупругих деформаций. Правильность данного подхода подтверждена положительными результатами эксплуатации телекоммуникационных космических аппаратов на базе платформ «Экспресс-1000» и «Экспресс-2000» разработки и изготовления АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» со сроком активного существования 15 лет, имеющих на борту транспондеры различных диапазонов мощностью до 15 кВт.

Библиографические ссылки

1. Надежность КА в современной среде // Новости космонавтики 2014. Т. 24, № 02 (373). С. 56–59.

2. «Экспресс-АМ6»: пополнение орбитальной группировки России // Сибирский спутник / ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 2014, № 15 (369). С. 1.

3. «Экспресс-АМ8» – новый спутник для российской орбитальной группировки // «Сибирский спутник» / ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». 2015. № 4 (377). С. 1.

4. SESAT спутник. Свободная общедоступная мультиязычная универсальная интернет-энциклопедия [Электронный ресурс] // RU.WIKIPEDIA.ORG : URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sesat_(%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA) (дата обращения: 01.04.2015)

5. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. М. : Энергия, 1968. 361 с.

6. Теплообмен в приборостроении / Г. М. Кондратьев [и др.] // Прикладная физика. Серия «Выдающиеся ученые ИТМО». СПб. : СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.

7. Spacecraft Thermal Control Handbook. Vol. I: Fundamental Technologies / ed. by David G. Gilmore. 2nd ed.; American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). Reston, Virginia, 2002, 836 p.

8. Прогнозирование надежности узлов и блоков радиотехнических устройств космического назначения на основе моделирования напряженно-деформируемых состояний / С. Б. Сунцов [и др.] // Томск : Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2012. 114 с.

9. Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]. 7-е изд. М. : Изд-во МГТУ, 2005. 648 с.

10. Соболев Н.Д., Егоров В.И. Термическая усталость и термический удар // Прочность и деформация в неравномерных температурных полях. М. : Госатомиздат, 1962. С. 94–183.

11. Шаповалов Л. А. Термическая устойчивость пластин и оболочек // Прочность и деформация в неравномерных температурных полях. М. : Госатомиздат, 1962. С. 241–255.

12. Основы расчета на ползучесть неравномерно нагретых деталей // Прочность и деформация в неравномерных температурных полях. М. : Госатомиздат, 1962. С. 183–239.

13. Карташов Е. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. 3-е изд. М. : Высш. шк., 2001. 550 с.

14. Самарский А. А., Бабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

15. Моделирование тепловыделяющих систем / А. Р. Дорохов [и др.] Томск : Изд-во НТЛ, 2000. 233 с.

16. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности : в 2 ч. М. : Высш. шк., 1982. 327 с.

17. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. М. : Энергоатомиздат,1983. 326 с.

18. Темников А. В., Слесаренко А. П. Современные приближенные методы решения задач теплообмена. Самара : Изд-во СамПИ, 1991. 88 с.

19. Самарский А. А. Численные методы математической физики. М. : Научный мир, 2000. 316 с.

20. Халиманович В. И., Синьковский Ф. К., Ишенина Н. Н. Сотовые конструкции для космических аппаратов связи и навигации: опыт проектирования и изготовления // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. (27–29 мая 2009, г. Днепропетровск) / Укр. НИИ технологии машиностроения. Днепропетровск, 2009. С. 161–171.

References

1. [Reliability of satellite in the modern environment]. *Novosti kosmonavtiki.* 2014, Vol. 24, No. 02 (373), P. 56–59 (In Russ.).

2. [Express-AM6. Replenishment of the telecom satellite orbital constellation]. *Sibirskii sputnik* ISS-Reshetnev. 2014, No. 15 (369), P. 1 (In Russ.).

3. [A new satellite for the Russian satellite orbital constellation]. *Sibirskii sputnik* ISS-Reshetnev. 2015, No. 4 (377), P. 1 (In Russ.).

4. *SESAT sputnik*. [SESAT Satellite]. Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sesat_(%F1%EF%F3%F2%ED%E8%EA) (accessed 01.04.2015).

5. Dul'nev G. N., Semyashkin E. M. *Teploobmen v radioelektronnykh apparatakh* [Heat transfer in avionics]. Moscow: Energiya, 1968. 361 p.

6. Kondrat'ev G. M., Dul'nev G. N, Platunov E. S. et al. [Heat transfer in unit design]. *Prikladnaya fizika*. St.Petersburg: SPbGU ITMO, 2003. 560 p.

7. Spacecraft Thermal Control Handbook Volume I: Fundamental Technologies. Edited by David G. Gilmore.–2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), Reston, Virginia, 2002, 836 p.

8. Suntsov S. B., Alekseev V. P., Karaban V. M. et al. *Prognozirovanie nadezhnosti uzlov i blokov radiotekhnicheskikh ustroistv kosmicheskogo naznacheniya na osnove modelirovaniya napryazhenno-deformiruemykh sostoyanii* [Prediction of reliability for spacecraft avionics on the basis of modelling] Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2012, 114 p.

9. Arzamasov B. N., Makarova V. I., Mukhin G. G. et al. *Materialovedenie* [Materials science]. College textbook. 7th ed. Moscow, Moscow State Technical University Publ., 2005, 648 p.

10. Sobolev N. D., Egorov V. I. [Thermal fatigue and thermal shock]. *Prochnost' i deformatsiya v neravnomernykh temperaturnykh polyakh* [Strength and distortion in uneven temperature fields]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1962, P. 94–183.

11. Shapovalov L. A. [Thermal strength of plates and shells]. *Prochnost' i deformatsiya v neravnomernykh temperaturnykh polyakh* [Strength and distortion in uneven temperature fields]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1962, P. 241–255.

12. [Basics to estimate yield for unevenly temperature stressed parts]. *Prochnost' i deformatsiya v neravnomernykh temperaturnykh polyakh* [Strength and distortion in uneven temperature fields]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1962, P. 183–239.

13. Kartashov E. M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in rigid bodies thermal conductivity theory]. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 550 p.

14. Samarskii A. A., Babishchevich P. N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Calculated thermal transfer]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 784 p.

15. Dorokhov A. R., Zavorin A. S., Kazanov A. M. et al. *Modelirovanie teplovydelyayushchikh sistem* [Modeling of dissipating systems]. Tomsk, NTL Publ., 2000, 233 p.

16. Belyaev N. M., Ryadno A. A. *Metody teorii teploprovodnosti* [Thermal conductivity theory methods]. Two vol.. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 327 p.

17. Zarubin V. S. *Inzhenernye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Engineering methods to solve thermal conductivity aspects]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 326 p.

18. Temnikov A. V., Slesarenko A. P. *Sovremennye priblizhennye metody resheniya zadach teploobmena* [Advanced methods of approximate problem solving on heat transfer]. Samara, SamPI Publ., 1991, 88 p.

19. Samarskii A. A. *Chislennye metody matematicheskoi fiziki* [Mathematical physics numerical methods]. Moscow: Nauchnyi mir, 2000, 316 p.

20. Khalimanovich V. I. et al. [Communication and navigation satellite honeycomb panels. Experience in design and manufacturing]. *Effektivnost' sotovykh konstruktsii v izdeliyakh aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki* [Efficiency of aircraft/spacecraft honeycomb structures]. 3rd international workshop package, Dnepropetrovsk, May, 27–29, 2009. Ukr. NII tekhnologii mashinostroeniya. Dnepropetrovsk, 2009, P. 161–171 (In Russ.).

© Тестоедов Н. А., Двирный В. В., Морозов Е. А., Двирный Г. В., Еременко Н. В., 2015

УДК 621.45.023:504

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 438–447

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ С ВОЗДУХОМ ЗА СРЕЗОМ СОПЕЛ ДВИГАТЕЛЕЙ САМОЛЕТА

А. О. Турчинович

Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20
E-mail: golubevaa@ngs.ru

Одним из важных этапов эксплуатации самолетов является гонка двигателей – проверка работоспособности силовых установок летательных аппаратов на специально оборудованных газоотбойниками площадках. Продолжительность данного этапа зависит от двигателей, установленных на самолетах, и может достигать 30 минут, как, например, для рассматриваемого в статье самолета Ан-12. При этом загрязняющие вещества, образующиеся в результате сгорания топлива, оседают на территории места для опробования двигателей и наносят значительный урон окружающей среде.

Целью настоящего исследования является разработка модели для анализа поведения струй выхлопных газов при столкновении с газоотбойником и анализа возможных химических реакций продуктов сгорания топлива с кислородом воздуха.

Качественный и количественный результат получен путем математического моделирования процесса опробования двигателей. В качестве геометрической модели принята двумерная модель самолета в плане и места для гонки. Кинематическая модель описывает максимальный режим рассматриваемого процесса, характеризующегося полным сгоранием топлива. Построены возможные химические реакции выхлопных газов с кислородом воздуха. Численная реализация данной задачи осуществлена с применением программного продукта Ansys Fluent. Результаты расчета показывают, что выхлопные газы при достижении газоотбойника претерпевают изменение траектории (рассеивание) и потерю скорости. При этом массовые доли продуктов сгорания топлива достигают своего максимального значения на срезе сопла, а массовые доли веществ, образующихся в ходе реакций с кислородом воздуха, – на границе струй с окружающей средой. Протекание реакций способствует увеличению области распространения загрязняющих веществ, полученных в результате окисления, по сравнению с веществами на срезе сопла.

Результаты анализа указанных процессов позволяют провести дальнейшее исследование, направленное на уменьшение загрязнения территорий для гонки двигателей. В последующем они могут быть применены на аэродромах, снабженных площадками для гонки двигателей, с целью снижения концентраций загрязнения на приаэродромных территориях.

Ключевые слова: самолет, гонка двигателей, газоотбойник, загрязняющие вещества, математическое моделирование, химические реакции.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 438–447

SIMULATION OF CHEMICAL INTERACTION OF COMBUSTION PRODUCTS WITH AIR BEHIND THE EXIT SECTION OF NOZZLES AIRCRAFT ENGINE

A. O. Turchinovich

Novosibirsk State Technical University
20, K. Marksa Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation
E-mail: golubevaa@ngs.ru

One of important operational phases of planes is an engine runup – check of operability of engine aircraft power units on the platforms which are specially equipped with blast fence. Duration of this stage depends on the engines installed on planes and can reach 30 minutes, such as for the An-12 plane considered in this article. Thus the pollutants formed as the result of fuel combustion cover the territory of a place for approbation of engines and cause the considerable environmental loss.

Objective of this research is model construction for the analysis of behavior of streams of combustion gases at collision with a blast fence and the analysis of possible chemical reactions of products of fuel combustion with air oxygen.

In this work I have received the qualitative and quantitative results using mathematical model of operation process of approbation of engines. As geometrical model I accepted the two-dimensional model of the plane in the plan and places for engines runup. The kinematic model describes the maximal mode of the considered process characterized by the complete combustion of fuel. Possible chemical reactions of combustion gases with oxygen of air are constructed under this condition. This task is solved by means of the Ansys Fluent software product solved. Results of calculation show that combustion gases undergo change of a trajectory (dispelling) and loss of speed when interacting with of a blast fence. Thus, the mass fractions of products of fuel combustion reach its maximum number on a nozzle exit. And the mass fractions of the substances formed during reactions with air oxygen reach its maximum number on border of streams with environment. Reaction behavior also promotes increase in area of distribution of the pollutants received as a result of oxidation in comparison with the substances set on a nozzle exit.

The received analysis of processes allows to conduct the further research directed on decrease of pollution of territories for engine runup. In the future they can be applied in the airfields supplied with platforms for engine runup for the purpose of decrease of concentration of pollution concentration on aerodrome environs.

Keywords: airplane, engine runup, blast fence, pollutants, mathematical model operation, chemical reactions.

Введение. За последние десятилетия роль авиатранспортных перевозок существенно возросла. Доля воздушных судов только в международных пассажирских перевозках достигает 80 и 40 % от общего числа региональных и международных перевозок [1]. Также увеличивается потребность в авиатранспортировке грузов. Такое развитие неизбежно приводит к обострению экологической ситуации, особенно это проявляется на территориях, наиболее подверженных влиянию выхлопных газов, т. е. территориях аэропортов и аэродромов [2–4]. Движение воздушных судов состоит из этапов, регламентированных Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) [5]:

– руление;
– взлет;
– набор высоты;
– заход на посадку;
– посадка;
– руление после посадки.

Указанные стадии взлетно-посадочного цикла были рассмотрены в статье [6].

В ходе эксплуатации самолетов можно выделить еще один немаловажный этап – гонку двигателей, при котором осуществляется запуск двигателей на различных режимах в рамках строго отведенного времени для проверки работоспособности силовых установок. На рис. 1 представлен пример графика опробования двигателей, соответствующие количественные характеристики приведены в табл. 1.

Гонка двигателей осуществляется на специально оборудованных газоотбойниками площадках. Газоотбойники являются преградой на пути выхлопных газов и могут иметь структуру сплошного, ячеистого забора или другие модификации (рис. 2).

Для различных самолетов (различных типов двигателей) продолжительность как отдельных режимов запуска двигателей, так и всего этапа гонки индивидуальна. Однако запуск двигателей на всех режимах, даже на непродолжительное время, оказывает существенное влияние на окружающую среду: повышение концентрации загрязняющих веществ, пыли, выгорание травы, шум. Все это крайне негативно сказывается на здоровье людей.

Чтобы уменьшить отрицательное воздействие, необходимо подробно рассмотреть данный процесс с учетом химической активности продуктов сгорания авиатоплива и их взаимодействия с окружающей средой.

Целью исследования является разработка модели для расчета распространения загрязнений от авиационных двигателей на территории, предназначенной для гонки, с учетом возможных химических реакций выхлопных газов с воздухом, а также исследование поведения струй при столкновении с газоотбойником.

Постановка задачи. Рассматривается максимальный режим для этапа гонки двигателей самолета Ан-12 при нормальном атмосферном давлении (нормальных погодных условиях) и встречном ветре 6 м/с. Схема для расположения самолета относительно газоотбойника приведена на рис. 3.

На самолете Ан-12 установлены двигатели АИ-20 [7], режимы работы которых приведены в табл. 1 [8]. Необходимой характеристикой для оценки уровня загрязнения территорий от двигателей воздушных судов является индекс эмиссии – количество загрязняющего вещества (ЗВ), получающегося при сгорании килограмма топлива, в граммах. В табл. 2 показаны индексы эмиссии для данного двигателя.

Структура потока вблизи самолета с работающими двигателями определяется химическим взаимодействием продуктов сгорания с компонентами воздуха и динамическим взаимодействием высокотемпературных и высокоскоростных струй с окружающей средой. Это приводит к образованию вихрей. Пространственная вихревая картина изменяется со временем, из чего следует необходимость численного моделирования нестационарной трехмерной задачи. Моделирование химических реакций само по себе является сложным, а в трехмерном случае это может стать невыполнимым. Тем не менее оценку основных процессов, реализующихся при обтекании газоотбойников загрязняющими веществами, возможно провести с помощью двумерного приближения в плоскости симметрии двигателей. Это позволит создать кинетическую модель и оценить уровень образования примесей, установить области, наиболее подверженные влиянию выхлопных газов. Решение задачи в двумерной постановке, возможно, позволит в дальнейшем перейти к детальному и качественному анализу в трехмерной нестационарной постановке с учетом химических реакций.

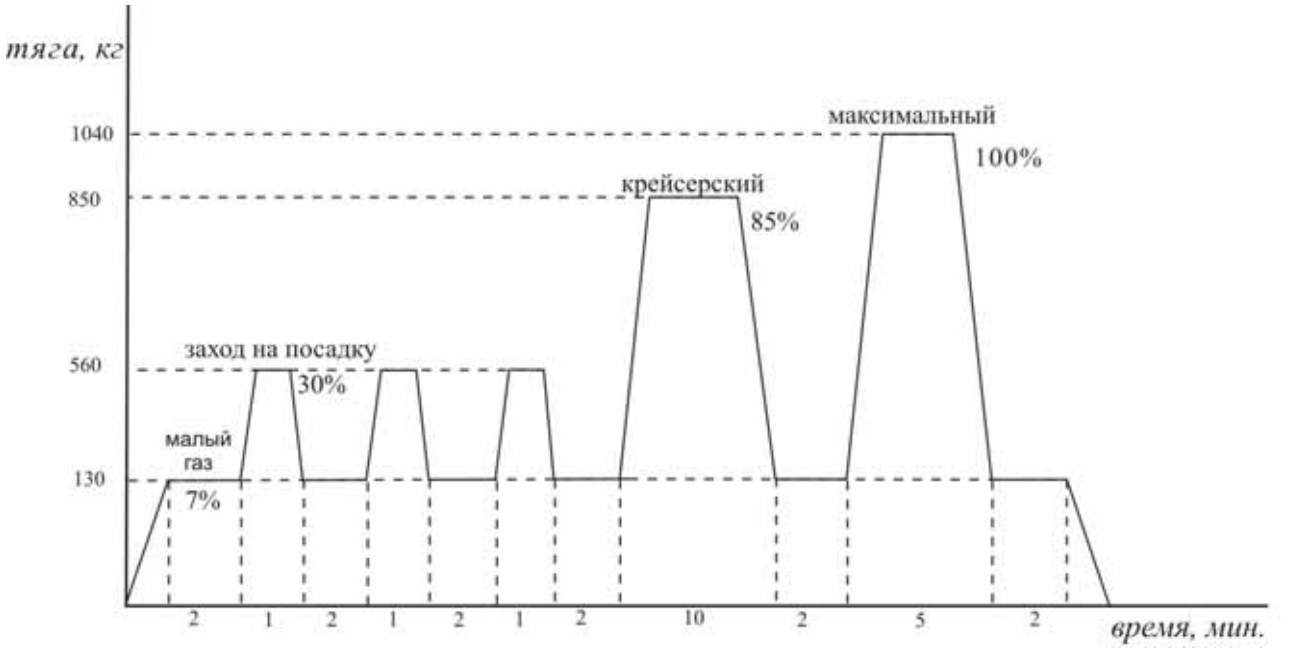


Рис. 1. График опробования двигателей

Таблица 1

Количественные характеристики этапа гонки двигателей

Режим гонки	Обороты, %	Время работы, мин	Часовой расход топлива, кг/ч
Максимальный	100	5	1040
Крейсерский	85–90	10	850
Заход на посадку	30	3	560
Малый газ	7	12	130

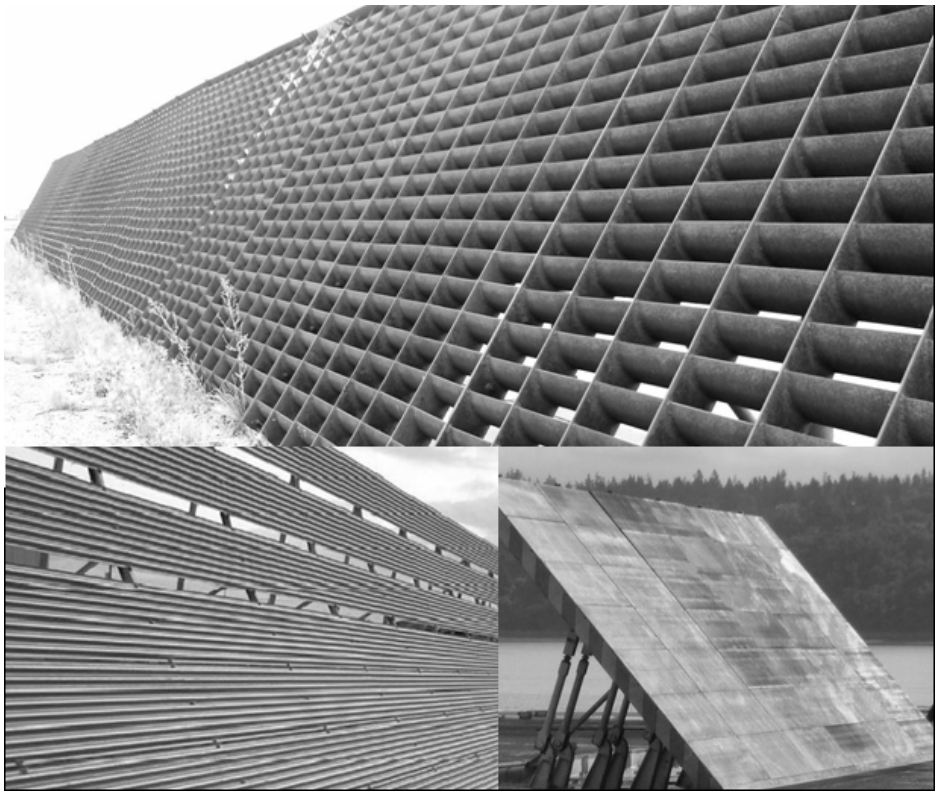


Рис. 2. Возможные модификации газоотбойников

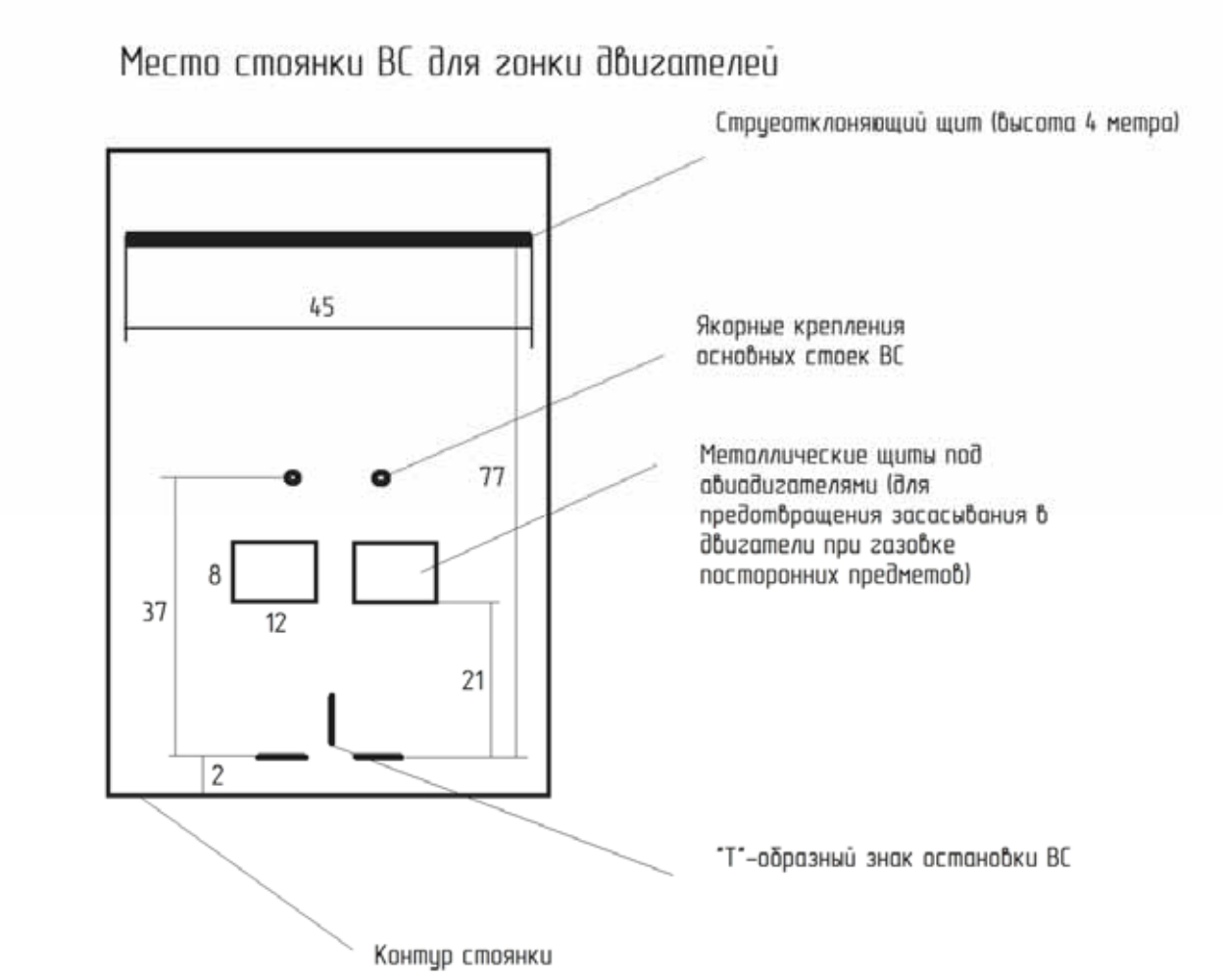


Рис. 3. Схема для расположения воздушного судна на месте для гонки двигателей

Таблица 2

Индексы эмиссии для различных режимов двигателя АИ-20

Этап	Индексы эмиссии, г/кг			
	Оксиды углерода CO	Углеводороды C_nH_m	Оксиды азота NO_x	Сажа
Максимальный режим	2,35	0	11,75	0,270
0,6 М	3,7	0	7,6	0,185
0,3 М	12,0	0	5,7	0,145
Крейсерский режим	7,7	0	6,6	0,154
Малый газ	77,3	12,2	2,04	0,104

Геометрическая модель представляет собой самолет Ан-12 в плане и газоотбойник, расположенные в соответствии с рис. 3.

Чтобы создать расчетную модель процессов, происходящих при выбранном этапе, обратимся к анализу топлива для самолета Ан-12 и оценим возможные химические реакции.

Для эксплуатации данных типов двигателей используется авиационное топливо ТС-1 [8]. В зависимости от химического состава и способа перегонки нефти в состав авиакеросина входят:

– предельные алифатические углеводороды – 20–60 %;
– нафтеновые – 20–50 %;
– бициклические ароматические – 5–25 %;
– непредельные – до 2 %;
– примеси сернистых, азотистых или кислородсодержащих соединений [9; 10].

Согласно [11], для топлива ТС-1 температура перегонки начинается со 150 °С, на рис. 4 представлена зависимость фракционного состава от температуры перегонки.

Для определенности примем следующий состав топлива:

– предельные алифатические углеводороды – алканы нормального и изостроения – 48 %;
– нафтеновые – 35 %;
– ароматические – 15 %;
– непредельные – 2 %.

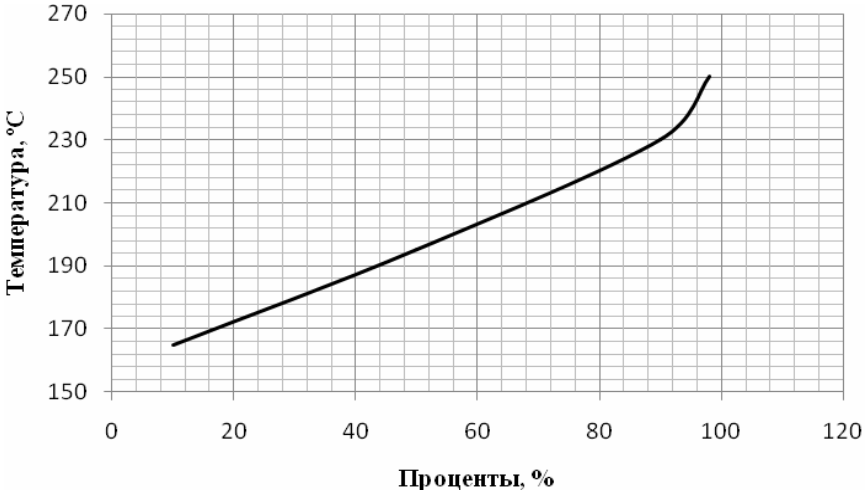


Рис. 4. Фракционный состав топлива ТС-1

Чтобы провести ориентировочный расчет ЗВ, образующихся при сгорании топлива, зададим условный состав топлива исходя из конкретных углеводородов, выкипающих в диапазоне от +150 до +250 °С.

1. Нормальный алкан: декан $C_{10}H_{22}$, $t_{кип}$ = 174,1 °С.
2. Изоалкан: 3-метилнонан $C_{10}H_{22}$ ($CH_3CH_2CH(CH_3)(CH_2)_5CH_3$), $t_{кип}$ = 167,8 °С.
3. Нафтеновые: циклодекан $C_{10}H_{20}$, $t_{кип}$ = 201 °С.
4. Ароматические: изопропилбензол C_9H_{12} ($C_6H_5CH(CH_3)_2$), $t_{кип}$ = 152,4 °С.
5. Непредельные углеводороды: децен $C_{10}H_{20}$, $t_{кип}$ = 170,6 °С.
6. Примесь сернистых соединений: тиофенол C_6H_5SH, $t_{кип}$ = 168,7 °С.
7. Примесь кислородсодержащих соединений: фенол C_6H_5OH, $t_{кип}$ = 181,7 °С.
8. Примесь азотсодержащих соединений: нитробензол $C_6H_5NO_2$, $t_{кип}$ = 210,9 °С.

При работе двигателей происходит процесс горения смеси. Представим реакции горения для каждого подобранного вещества.

1. Вариант полного окисления для декана:

$$C_{10}H_{22} + 15{,}5O_2 \rightarrow 10CO_2 + 11H_2O.$$

В случае если происходит неполное окисление, в результате реакции могут появиться монооксиды углерода, элементарный углерод или несгоревшие углеводороды:

$$C_{10}H_{22} + 13O_2 \rightarrow 5CO_2 + 5CO + 11H_2O$$

$$C_{10}H_{22} + 12{,}5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 4CO + C + 11H_2O$$

$$C_{10}H_{22} + 0{,}5O_2 \rightarrow 2C_5H_{10} + H_2O$$

$$C_{10}H_{22} + 5{,}5O_2 \rightarrow C_5H_{10} + 5CO + 6H_2O$$

$$C_{10}H_{22} \xrightarrow{[O]} C_9H_{18} + CH_4 + H_2O$$

$$\xrightarrow{[O]} C_8H_{16} + C_2H_4 + H_2O$$

$$\xrightarrow{[O]} C_7H_{14} + C_3H_6 + H_2O$$

$$\xrightarrow{[O]} C_6H_{12} + C_4H_8 + H_2O$$

$$\xrightarrow{[O]} 2C_5H_{10} + H_2O$$

При неполном горении углеводородов возможно образование спиртов, альдегидов или кислот:

$$R-CH_2-CH_2-CH_3 \xrightarrow{[O]} R-CH_2-CH_2-CH_2OH \xrightarrow{[O]}$$

$$\xrightarrow{[O]} R-CH_2-CH_2-CH_2 \underset{\backslash H}{=} O \xrightarrow{[O]} R-CH_2-CH_2-COOH$$

Однако наличие таких соединений в двигательной установке крайне нежелательно, поэтому образование данных продуктов сводится к минимальному, путем подбора состава топлива и конструкции самого двигателя. В связи с этим подобные реакции не рассматриваются.

2. Для изоалканов имеем аналогичное уравнение полного окисления:

$$C_{10}H_{22} + 15{,}5O_2 \rightarrow 10CO_2 + 11H_2O$$

Неполное окисление точно также может дать в виде продуктов сгорания монооксид углерода, диоксид углерода и воду. Это справедливо для любых реакций горения углеводородов.

3. Для нафтеновых углеводородов имеем при полном горении:

$$C_{10}H_{20} + 15O_2 \rightarrow 10CO_2 + 10H_2O$$

4. Для изопропилбензола реакция горения запишется в виде

$$C_9H1_2 + 12O_2 \rightarrow 9CO_2 + 6H_2O$$

5. Для непредельных углеводородов в результате горения получим следующее соотношение углекислого газа и воды:

$$C_{10}H_{20} + 15O_2 \rightarrow 10CO_2 + 10H_2O$$

6. При горении сернистых соединений выделяется не только ди-, монооксид углерода и вода, но и оксиды серы, элементарная сера:

$$C_6H_5SH + 4{,}5O_2 \rightarrow 6CO + S + 3H_2O$$

$$C_6H_5SH + 5{,}5O_2 \rightarrow 6CO + SO_2 + 3H_2O$$

$$2C_6H_5SH + 13O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6CO + SO_2 + S + 6H_2O$$

В присутствии кислорода воздуха и повышенных температур газовоздушной смеси на выбросе из сопла возможно дальнейшее окисление серы:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2$$

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$

7. При горении кислородсодержащих углеводородов получаем диоксид углерода и воду:

$$C_6H_5OH + 7O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$$

8. В ходе реакции горения нитробензола появляются оксиды азота, а также диоксид углерода и вода:

$$2C_6H_5NO_2 + 13{,}5O_2 \rightarrow 12CO_2 + 5H_2O + 2NO$$

$$2C_6H_5NO_2 + 13O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6CO + NO + NO + 5H_2O$$

$$C_6H_5NO_2 + 7{,}25O_2 \rightarrow 6CO_2 + NO_2 + 2{,}5H_2O$$

Появление других оксидов азота не рассматривается, поскольку это маловероятно.

Подчеркнем, что реакция горения сопровождается разрушением углерод-углеродной связи и выделением большого количества энергии, поэтому мы не рассматриваем реакции окисления, в результате которых могут получиться спирты, альдегиды или кислоты.

Таким образом, в результате горения могут образоваться следующие соединения:

– монооксид углерода (CO);
– диоксид углерода (CO_2);
– монооксид азота (NO);
– диоксид азота (NO_2);
– элементарная сера (S);
– диоксид серы (SO_2);
– несгоревшие углеводороды (C_nH_m);
– сажа (C);
– вода (H_2O).

Несмотря на достаточно обширный состав выхлопных газов, нормами ИКАО регулируются только выбросы NO_x, CO, C_nH_m, сажи как наиболее вредных и преимущественных [5]. Остальные вещества выделяются в столь незначительных количествах, что их концентрации не регламентируются. В связи с этим возможно следующее взаимодействие загрязняющих веществ, полученных в результате сгорания топлива, с кислородом воздуха:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad (1)$$

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 \quad (2)$$

Важными параметрами уравнений (1), (2) кроме стехиометрических коэффициентов являются энергия активации и предэкспоненциальный множитель, входящие в уравнение Аррениуса [12; 13]:

$$k = Ae^{-E/RT}, \quad (3)$$

где E – энергия активации; A – предэкспоненциальный множитель; k – константа скорости реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Согласно [12; 13] для реакции (1): $A = 3{,}5 \cdot 10^{14}$, $E = 2{,}1 \cdot 10^{-3}$ кДж/моль; согласно [12; 13] для реакции (2): $A = 1 \cdot 10^{9}$, $E = -4{,}7$ кДж/моль.

Таким образом, создана двумерная модель, позволяющая провести анализ распространения загрязняющих веществ из сопел двигателей и их взаимодействие с компонентами воздуха при различных режимах запуска силовых установок.

Численная реализация. Поставленная задача может быть решена с помощью программного продукта Ansys Fluent, который является мощным инструментом в вычислительной гидродинамике и большим плюсом которого является наличие возможности моделировать химические реакции [14; 15]. Созданную двумерную модель самолета в плане и области для гонки двигателей разобьем на конечные элементы, используя сеточный генератор ICEM. Регулярная сетка из прямоугольных элементов приведена на рис. 5 и состоит из 197 146 узлов (198 584 элемента).

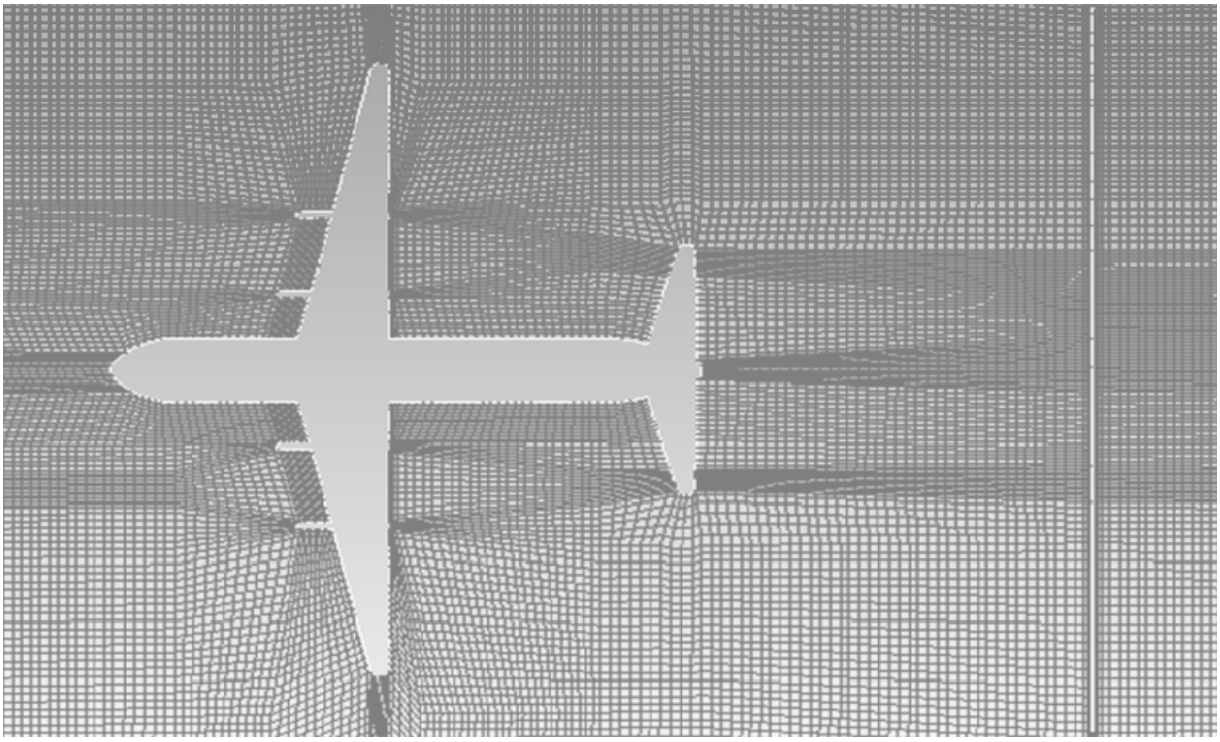


Рис. 5. Конечно-элементная модель Ан-12

Зададим глобальные настройки расчета. Рассмотрим стационарную задачу. В качестве решателя воспользуемся связанным решателем density-based. В общем случае он решает уравнения количества движения, уравнение состояния, уравнение энергии и уравнение переноса компонентов в виде единого связанного набора в векторной форме. После чего отдельно от связанного набора решаются уравнения дополнительных моделей, таких как уравнения моделей турбулентности.

Обязательной составляющей в настройках параметров является активация уравнения энергии. Среди вязких моделей выбрана модель турбулентности *k-omega standard*. Данная модель является одной из наиболее применимых, не требует ограничений параметров k и ω и чувствительна к граничным условиям во внешнем потоке.

Для того чтобы можно было учесть в расчетах химические реакции, воспользуемся опцией volumetric (объемные химические реакции) в разделе «Виды моделей» – species transport (перенос компонентов). Будем использовать модель конечной скорости химической реакции.

Опираясь на выбранную модель процессов, в качестве материала зададим смесь NO, NO_2, CO, сажи; выбросы C_nH_m для максимального режима тяги отсутствуют (см. табл. 2).

В разделе Reactions запишем реакции (1) и (2) и укажем соответствующие значения энергии активации, предэкспоненциального множителя и скорости реакций.

В качестве граничных условий приняты:

– на входной границе (Inlet): скорость набегающего потока, что соответствует скорости ветра, а также атмосферное давление, равное 101 325 Па; в качестве материала задаем массовые доли основных компонентов воздуха: O_2 – 0,23, N_2 – 0,77;

– боковая поверхность (Far-field): свободная граница – мягкие граничные условия, задаются давление в окружающей среде и скорость ветра; в качестве материала задаем массовые доли основных компонентов воздуха: O_2 – 0,23, N_2 – 0,77;

– условия на выходе из сопел (Nozzle exit): условие массового расхода (см. табл. 1) и давление на срезе сопла. Анализ возможных химических реакций показывает, что при горении нитробензола возможно образование продуктов сгорания в виде оксида азота. При этом диоксид азота может образовываться путем взаимодействия полученного оксида азота с кислородом воздуха – согласно уравнению (2). Основываясь на этом, рассмотрим случай, когда задается смесь CO, NO, C. Массовая доля каждого вещества определена согласно табл. 2 для максимального режима: NO – 0,8177, CO – 0,1635, сажа (C) – 0,0188.

– условия на выходной границе (outlet): нормальное атмосферное давление – 101 325 Па.

– условие на газоотбойнике (wall) – непроницаемая стена.

Данную постановку задачи в решателе density-based будем решать с помощью неявной схемы решения. Для неявной схемы неизвестная переменная вычисляется в каждом узле путем деления известных и неизвестных значений в соседних узлах. При этом будем использовать второй порядок точности.

При выборе неявной схемы решения в решателе density-based каждое уравнение в сочетании с дополнительными уравнениями линеаризуется неявно в отношении всех неизвестных в уравнении. Это приводит к системе с N уравнениями для каждого узла. С помощью многосеточного алгебраического решателя происходит линеаризация для всех N в каждом узле.

Тип потока выбран *Roe-FDS*. «Подход Роэ основан на квазилинейной форме уравнений Эйлера и предполагает построение некоторой матрицы, являющейся аналогом якобиана применительно к задаче о распаде разрыва. На матрицу налагается ряд условий, при которых задача становится гиперболической и разрешимой, а метод консервативным, и обеспечивается необходимая гладкость аппроксимации вектора потока при вариации состояний слева и справа» [15, с. 159].

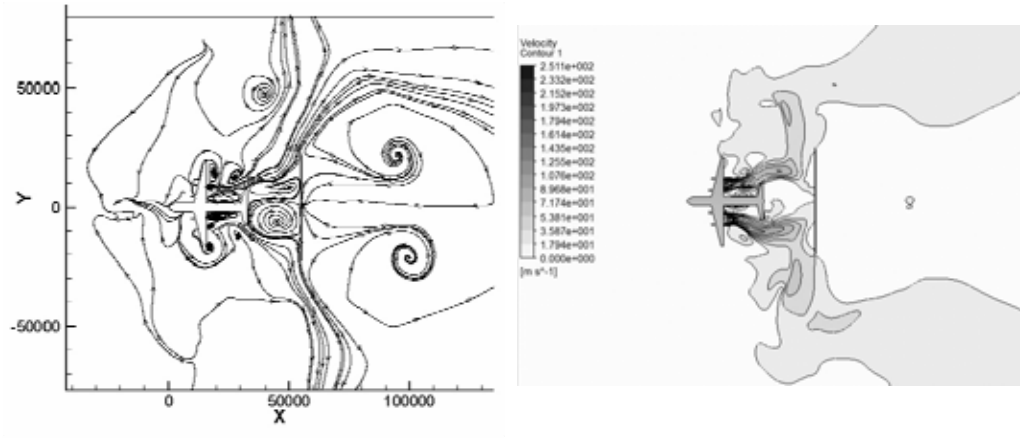
Результаты моделирования. В результате расчета в стационарной постановке получены следующие результаты (рис. 6–8).

На рис. 6, *а* представлены линии тока. График наглядно иллюстрирует, что, несмотря на внешне симметричную задачу, поведение вихревых структур не является симметричными. Это объясняется тем, что дозвуковое течение характеризуется распространением возмущений в разные стороны, что и приводит к наличию асимметрии. Ввиду данного обстоятельства задача рассматривается в ее полной постановке.

На рис. 6, *б* приведено распределение скорости при выходе из сопел: черный цвет соответствует максимальной скорости, белый (светло-серый) – минимальной. Из рис. 6 видно, что максимальная скорость выхлопных газов достигается на срезе сопла и составляет 251 м/с, что не противоречит реальным скоростям на выходе из сопла для самолета Ан-12. При отдалении скорость постепенно уменьшается. Достигая хвоста самолета, струи огибают его; также наблюдается смещение струй от траектории первоначального движения за счет образования вихрей вдоль фюзеляжа (рис. 6, *б*). Далее на своем пути поток выхлопных газов встречает газоотбойник, при столкновении с ним часть потока отклоняется в стороны, а часть огибает стоящую на пути преграду, при этом происходит потеря скорости струй.

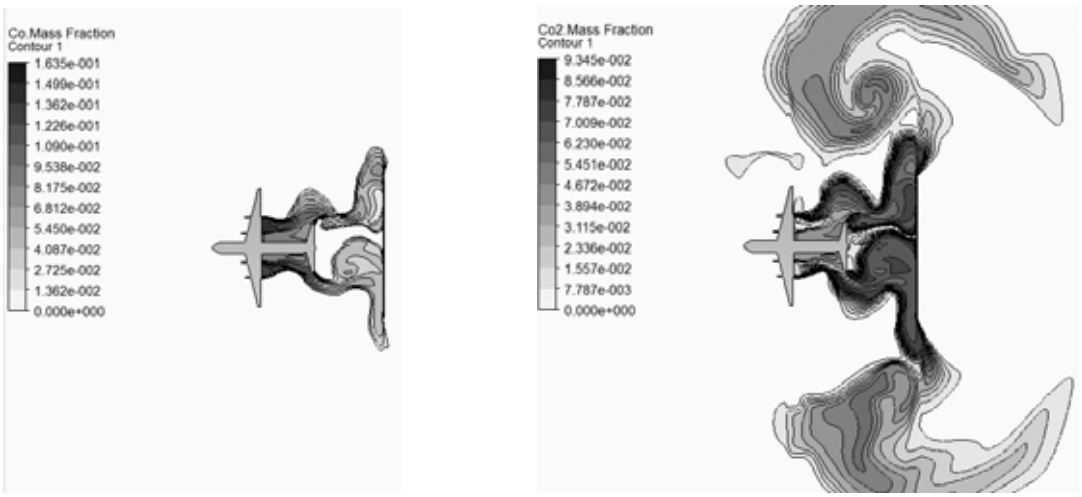
На рис. 7, *а* приведено распределение угарного газа CO. Данное вещество задавалось в виде исходных данных, и максимальное значение достигается на срезе сопла, чему соответствует черная область на диаграмме – составляет 0,1635. Следует отметить, что несимметричность распределения ЗВ определена несимметричностью вихревых структур (рис. 6).

На рис. 7, *б* показано распределение углекислого газа CO_2. Данное вещество было получено в ходе химической реакции угарного газа и кислорода воздуха (уравнение (1)). Реакция (1) определяет конфигурацию распространения CO_2, которая больше соответствующей области CO. Максимальные массовые доли углекислого газа, равные 0,09345, находятся на границе с воздухом, т. е. протекание реакций происходит на отдалении от сопел двигателей. Картина распространения CO_2 также не является симметричной в силу особенностей вихревых структур.

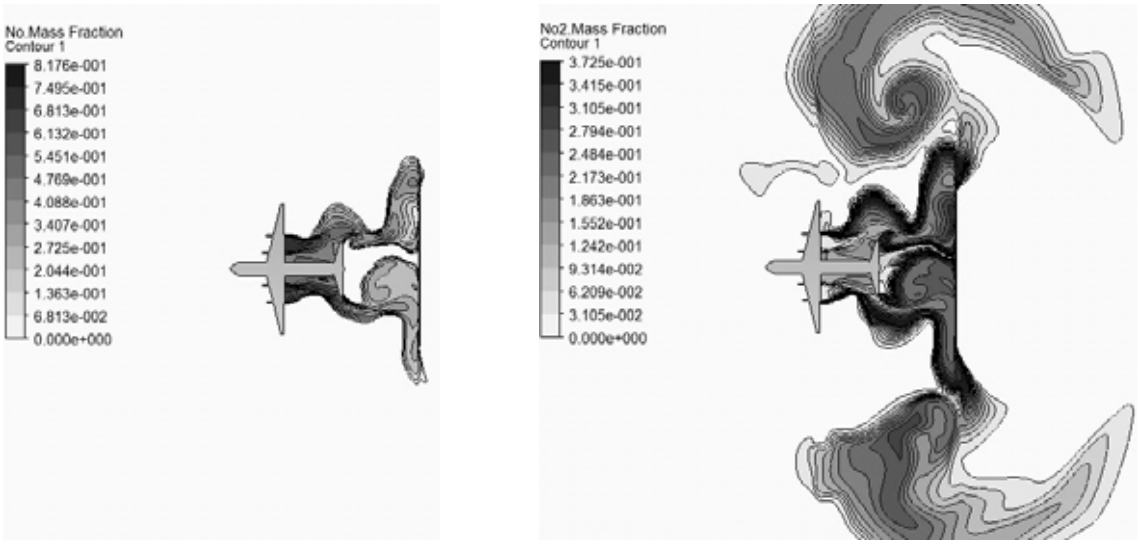


а *б*

Рис. 6. Динамическая картина потока:
а – график линий тока; *б* – распределение скорости



а *б*



в *г*

Рис. 7. Распространение загрязняющих веществ:
а – угарного газа (CO); *б* – углекислого газа (CO_2); *в* – оксида азота (NO); *г* – диоксида азота (NO_2)

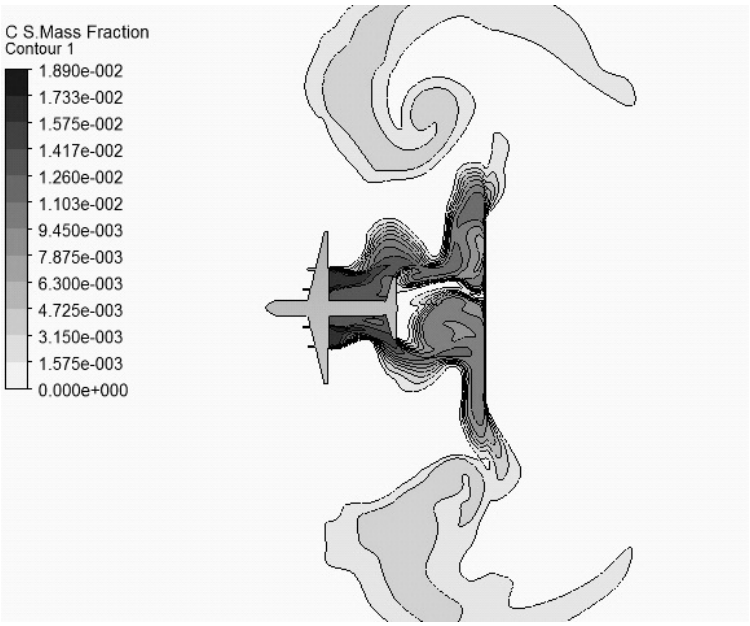


Рис. 8. Распространение сажи (C)

Аналогичный результат получен для реакции оксида азота с кислородом воздуха (уравнение (2)). Массовые доли оксида азота, который выступает в виде реагирующего вещества, достигают максимальных значений на выходе из двигателей и равны 0,8177. Отдаляясь от двигателя, происходит постепенное уменьшение этих значений (рис. 7, *в*). Продукт реакции – диоксида азота – имеет максимальную массовую концентрацию, равную 0,3725, на некотором расстоянии от сопел двигателя (рис. 7, *г*). Следует отметить несимметричность картины распространения ЗВ, что наблюдалось и в предыдущей реакции.

Оксиды углерода и азота являются исходными веществами и, вступая в химические реакции с компонентами воздуха, образуют углекислый газ и диоксид азота соответственно. Сажа является инертной и не реагирует с составляющими воздуха. Поэтому область распространения сажи отличается от полей концентраций угарного газа и оксида азота (рис. 8). Однако максимальное значение концентрации сажи, как и в случае с NO и CO, достигается на срезе сопел, что соответствует черному цвету на диаграмме – составляет 0,0189 (рис. 8).

Заключение. Эксплуатация воздушных судов помимо стандартного взлетно-посадочного цикла включает этап гонки двигателей, который состоит из этапов, соответствующих различным режимам тяги. Высокотемпературные и высокоскоростные струи, выходящие из сопел двигателей, при взаимодействии с окружающей средой приводят к образованию вихрей. Для детального анализа требуется рассматривать трехмерную, нестационарную задачу, однако оценку основных процессов, реализующихся при обтекании газоотбойников загрязняющими веществами, возможно провести в двумерной постановке в плоскости симметрии двигателей. В настоящей статье рассмотрен максимальный режим этапа гонки, характеризующийся полным сгоранием топлива. Созданная двумерная модель самолета и места для опробования двигателей, а также кинетическая модель позволяют в рамках данных допущений провести расчет химических реакций загрязняющих веществ с компонентами воздуха и проанализировать область их распространения. Из полученных результатов видно, что задача несимметричная за счет несимметричности вихрей. Данная особенность отражается в соответствующих распределениях скоростей и концентраций загрязняющих веществ. При этом загрязняющие вещества, которые задавались в качестве исходных данных, достигают максимальных массовых концентраций на срезе сопла, а продукты, полученные в результате химических реакций, имеют максимальные концентрации на некотором отдалении от сопел двигателей – на границе с воздухом.

Также стоит отметить, что ЗВ при выходе из сопел вначале огибают хвост самолета, а затем сталкиваются с газоотбойником. При столкновении происходит торможение частиц выхлопных газов и их рассеивание в области преграды.

Созданная модель и полученные первые результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях, направленных на уменьшение концентрации выхлопных газов на территории для опробования двигателей, что особенно актуально для аэропортов и аэродромов.

Благодарности. За обсуждение кинетической модели выражаю благодарность к.г-м.н., доценту Н. И. Ларичкиной и д.х.н., профессору М. Н. Тимофеевой кафедры инженерных проблем экологии факультета летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

Acknowledgments. I give thanks to Cand.Sc., Docent, N. I. Larichkina and Dr. Sc., professor M. N. Timofeeva, Department of Engineering Issues in Ecology of Aircraft Faculty of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Professional Education Novosibirsk state technical university, for discussion of a kinetic model.

Библиографические ссылки

1. Ковалёв И. Авиационная наука: взгляд в будущее [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. 2008. № 11. URL: http://www.nkj.ru/archive/articles/14887/ (дата обращения: 06.01.2015).

2. Uliasz M., Stocker R. A., Pielke R. A. Regional modeling of air pollution transport in the southwestern United States. Environmental Modeling III / ed. P. Zannetti. Computational Mechanics Publications, 1996. Pp. 145–182.

3. Emissions and Dispersion Modeling System User's Manual. Prepared for Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy Washington. DC Prepared by CSSI, Inc. Washington, 2013.

4. Barrett M. Aircraft, and the global environment // World Aerosp. Technol'92 : Int. Rev. Aerosp. Des. And Dev. London, 1992. Pp. 32–37.

5. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 16 ИКАО. Т. 2. Эмиссия авиационных двигателей. 2008. 118 с.

6. Голубева А. О., Коротаева Т. А., Ларичкин В. В. Численный расчёт рассеивания загрязняющих веществ от эксплуатации самолётов на прилегающих к аэропортам и аэродромам территориях // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2014. № 1(22). С. 52–61.

7. Руководство по летной эксплуатации. Самолет Ан-12. М. : АСЦ ГосНИИ ГА, 2007. 506 с.

8. Авиационный турбовинтовой двигатель АИ-20. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. Ростов н/Д. : Технолог, 2004. 414 с.

9. ТС-1 – Топливо самолетное [Электронный ресурс]. URL: http://www.topreg.ru/slovar/ts-1-toplivo-samoletnoe (дата обращения: 26.12.2014).

10. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. М. : Транспорт, 1970. 256 с.

11. ГОСТ 10227–86. Топливо для реактивных двигателей. М. : Изд-во стандартов, 2013. 10 с.

12. Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. Химия, 1974. 200 с.

13. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Топлива на основе кислорода / В. Е. Алемасов [и др.] // М., 1972. Т. 2. 256 с.

14. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide. Изд-во ANSYS, Inc. Southpointe, 2011. 1146 с.

15. Волков К. Н. Разностные схемы расчета потоков повышенной разрешающей способности и их применение для решения задач газовой динамики // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. С. 159.

References

1. Kovalev I. [Aviation science: prospection]. *Nauka i zhizn'*. 2008, No. 11 (In Russ.). Available at: http://www.nkj.ru/archive/articles/14887/ (accessed 06.01.2015).

2. Uliasz M., Stocker R. A., Pielke R. A. Regional modeling of air pollution transport in the southwestern United States. Environmental Modeling III, ed. P. Zannetti, Computational Mechanics Publications. 1996, P. 145–182.

3. Emissions and Dispersion Modeling System User's Manual. Prepared for Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy Washington, DC Prepared by CSSI, Inc., Washington, DC, June 2013.

4. Barrett M. Aircraft, and the global environment. "World Aerosp. Technol'92:Int.Rev.Aerosp. Des. And Dev." London, 1992, P. 32–37.

5. [The international standards and the recommended practice]. *Prilozhenie 16 IKAO, t. 2 "Emissiya aviatsionnykh dvigateley"* [Appendix 16 ICAO, Vol. 2 "Emission of aviation engines"]. 2008, 118 p.

6. Golubeva A. O., Korotaeva T. A., Larichkin V. V. [Numerical calculation of a dispelling of pollutants from operation of planes in territories, adjacent to the airports and airfields]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*. 2014, No. 1(22), p. 52–61 (In Russ.).

7. *Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii. Samolet An-12* [Guide to flight operation. An-12 plane]. Moscow, ASC State scientifically research institute of Civil aviation, 2007, 506 p.

8. *Aviatsionny turbovintovoy dvigatel' AI-20. Instruktsiya po ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu* [Aviation turbo-propeller AI-20 engine. Maintenance instruction and to maintenance]. Rostov on Don, Tekhnolog Publ., 2004, 414 p.

9. *TS-1 – Toplivo samoletnoe* [TS-1 – Fuel plane] (In Russ.) Available at: http://www.topreg.ru/slovar/ts-1-toplivo-samoletnoe (accessed 26.12.2014).

10. Aksenov A. F. *Aviatsionnye topliva, smazochnye materialy i spetsial'nye zhidkosti* [Aviation fuels, lubricants and express liquids]. Moscow, Transport Publ., 1970, 256 p.

11. *GOST 10227-86. Toplivo dlya reaktivnykh dvigateley* [State Standard 10227-86. Jet aircraft fuel]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 10 p.

12. Mishchenko K. P., Ravdel' A. A. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Short critical tables]. Chemistry, 1974. 200 p.

13. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya. Topliva na osnove kisloroda* [Thermodynamic and thermal properties of products of combustion. Fuels on the basis of Oxygen]. Moscow. 1972, Vol. 2, 256 p.

14. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide. Pupl. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011, 1146 p.

15. Volkov K. N. [Difference schemes of calculation of streams of the increased resolving power and their application for problem solving of gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie*. 2005, Vol. 6, P. 159 (In Russ.).

© Турчинович А. О., 2015

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

УДК 539.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 450–455

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МОНО- И БИСЛОЕВ CrN

А. В. Куклин[1*], А. А. Кузубов[1,2], В. М. Денисов[1], Е. А. Ковалева[1], С. А. Шостак[1]

[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
[*]E-mail: artem.icm@gmail.com

В последнее время такие материалы, как графен, h-BN и дихалькогениды переходных металлов, получают широкое применение в различных областях (спинтроника, фотовольтаика, валлейтроника) в связи с их низкой размерностью и проявлением свойств, отличных от их объемных аналогов. В то же время на данном этапе развития науки активно исследуются другие двумерные материалы, в том числе нитриды и карбиды переходных металлов. Некоторые из них уже экспериментально получены, охарактеризованы и имеют большой потенциал применения в наноэлектронике. Схожие с графеном 2D-структуры могут быть основаны на нитриде хрома, магнитные своиства которого будут зависеть от координационного числа и, соответственно, количества неспаренных электронов. В данной работе, используя метод PAW и обобщенное градиентное приближение GGA-PBE в рамках теории функционала плотности (DFT+U) с коррекцией слабого дисперсионного взаимодействия, было предсказано существование моно- и бислоев нитрида хрома с кристаллографическими индексами поверхностей (100) и (111). Показано изменение геометрии двумерных структур относительно кристаллической фазы. Полученные 2D CrN (100) и (111) являются идеально плоскими. Для сравнения энергетической стабильности двумерного CrN была рассчитана относительная энергия образования монослоя. Проведены спин-поляризованные расчеты ферромагнитного и антиферромагнитного состояний. Анализ электронной структуры указывает на то, что данные материалы являются ферромагнетиками со 100 % спиновой поляризацией. В соответствии с классической моделью Гейзенберга был рассчитан обменный параметр J для монослоя (100). Исследована зависимость изменения свойств при переходе от моно- к бислойным структурам.

Ключевые слова: CrN, тонкие пленки, монослои, DFT, ab initio, спинтроника.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 450–455

QUANTUM CHEMICAL STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF CrN MONO- AND BILAYER

A. V. Kuklin[1*], A. A. Kuzubov[1,2], V. M. Denisov[1], E. A. Kovaleva[1], S. A. Shostak[1]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: artem.icm@gmail.com

Lately, such materials as graphene h-BN and transition metal dichalcogenides have been widely used in various fields and have received a lot of attention owing to its numerous device applications (spintronics, photovoltaic, valleitronics). This is due to the low dimensionality and different properties from those bulk materials. At the same time, at this stage of scientific development, other two-dimensional materials have been actively studied, including carbides and nitrides of transition metals. Some of them have been experimentally obtained, characterized and have great potential for application in nanoelectronics. Similar to the 2D graphene structures can be based on chromium nitride whose magnetic properties will depend on the coordination number and the number of uncoupled electrons correspondingly .In this work, using PAW method and the gradient corrected density functional GGA-PBE within the framework of generalized Kohn–Sham density functional theory (DFT+U) considering weak dispersion interaction, we have predicted the existence of a chromium nitride mono- and bilayers of (100) and (111) crystallographic surface. It was shown that the monolayers geometry relative to the crystalline phase was changed. The 2D CrN (100) and (111) are perfectly flat. To comparison of the energy stability of two dimensional CrN the relative energy of monolayer formation was calcu-

lated. Using spin-polarized calculations we calculate ferromagnetic and antiferromagnetic states. The analysis of electronic structure shows that these materials are ferromagnets with 100 % spin polarization. According to the classical Heisenberg model, the exchange parameter J has been calculated (for monolayer 100). The dependence of the changes in the properties during the transition from mono to bilayers structures was investigated.

Keywords: CrN, thin films, monolayers, DFT, ab initio, spintronics.

Введение. В последнее время двумерные материалы (2D), такие как графен, *h*-BN, дихалькогениды переходных металлов, имеют широкое применение в различных областях. Одной из них является спинтроника. Она открывает возможность принципиально новых решений в электронике, позволяя использовать не только заряд, но и спин электрона для хранения и передачи информации. В спинтронике двумерные материалы могут быть использованы в качестве электронных микросхем, полевых транзисторов. Помимо спинтроники двумерные материалы могут быть использованы как составные компоненты суперконденсаторов и т. д.

В то же время необходимо учитывать, что графен и другие низкоразмерные материалы, такие как гексагональный нитрид бора (*h*–BN), дихалькогениды переходных металлов, имеют свойства, отличные от их кристаллических аналогов. Многочисленные исследования продемонстрировали, что магнетизм наноматериалов фундаментально отличается от кристаллических аналогов в связи с тем, что магнитный момент системы определяется прежде всего количеством неспаренных электронов и, следовательно, сильно зависит от координационных чисел атомов. Ныне существующие 2D-структуры, такие как чистый графен, гексагональный BN и монослои дихалькогенидов переходных металлов, являются немагнитными или слабомагнитными.

Похожие 2D-материалы могут быть основаны на соединениях переходных металлов, в частности, на их нитридах. Нитриды переходных металлов (TMN) обладают значительной твердостью, высокой электропроводностью, высокой температурой плавления, большой энтальпией образования и коррозионной стойкостью [1–3]. С точки зрения магнитных свойств тонкие пленки нитридов могут быть очень интересны. Неспаренные *d*-электроны атомов переходных металлов, которые расположены на поверхности пленки, играют важную роль в формировании электронной структуры этих пленок. Нитрид хрома имеет две основные фазы: NaCl-type с симметрией Fm-3m (парамагнетик при нормальных услових) и ортогональную фазу с симметрией Pnma (антиферромагнетик) [4; 5]. Однако Миао и Ламбрехт установили, что кубическая фаза энергетически более стабильна [6]. При понижении температуры ниже 273–286 К в случае кубической структуры наблюдается переход в антиферромагнитное состояние с послойным упорядочением магнитных моментов [7–9]. Также в нескольких работах отмечено, что в области ~285–286 К нитрид хрома проявляет свойства полупроводника с шириной запрещенной зоны 0,07–0,09 eV [4; 10; 11].

Экспериментально получают пленки нитридов, используя в качестве подложки MgO, Pt или Al_2O_3 [11–14]. При этом в случае нитрида хрома температуры Нееля получаются разными, а структура тонких пленок имеет небольшое искажение при ориентации (001). В то же время пленка CrN (111) структурных искажений не имеет [11]. Параметр решетки MgO близок к значению аналогичной величины CrN, что позволяет вырастить пленку без существенных дефектов. Элементарные ячейки пленок поверхности (111) имеют гексагональную симметрию.

В последнее время монослои карбидов [15] и нитридов [16; 17] активно исследуются в связи с потенциальными возможностями их широкого применения в наноэлектронике. Получение на практике двумерного карбида титана с OH-восстановленной поверхностью показало, что другие карбиды переходных металлов (в том числе в составе с несколькими металлами) также могут быть синтезированы путем погружения во фторводородную кислоту с последующей обработкой ультразвуком [18]. В свою очередь, с помощью DFT-моделирования, были описаны магнитные свойства монослоя VN (111) и его композита в составе с MgO (111). При различных конфигурациях подложки MgO (111) и VN (111) друг относительно друга образуется стабильный нанокомпозит, в котором выгодной конфигурацией является система с расположением атомов ванадия над атомами кислорода. Результаты DFT-моделирования также показали, что монослой является спин-поляризованным и сохраняет свои свойства после контакта с подложкой MgO [19].

Таким образом, с целью исследовать стабильность и магнитные свойства моно- и бислоев нитрида хрома в данной работе проведены квантово-химические расчеты их атомной и электронной структуры.

Методы расчета. Все расчеты были выполнены в лицензионном программном пакете VASP [20] в рамках DFT GGA PBE [21–23]. В случае нитрида хрома использовалась коррекция Хаббарда (GGA+U) [24; 25]. Значение параметра $U^* = U - J$ было выбрано на основе предыдущих расчетных работ по исследованию нитрида хрома [14; 26] и составило 3 eV. В расчетах была применена поправка Гримма D3 [27] для учета слабого дисперсионного взаимодействия, метод PAW [28; 29] и периодические граничные условия (PBC). Энергия обрезания в плосковолновых базисных наборах была принята равной 400 эВ. Обратное пространство в первой зоне Брюллюэна автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста–Пака [30]. Количество *k*-точек вдоль каждого из направлений составило 12 × 12 × 12. Также был проведен сравнительный расчет с 18 × 18 × 18 *k*-точек. Результаты показали, что разница в абсолютном значении энергии систем с различной сеткой разбивки обратного пространства составляет менее 0,01 eV, что свидетельствует о достаточной точности при расчете с набором 12 × 12 × 12. При расчете моно- и бислоев

количество k-точек составило 1 × 12 × 12. При моделировании исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/ Å. Чтобы исключить взаимодействие между образами пластин, в расчете с периодическими условиями использовался вакуумный промежуток ~ 15 Å.

Результаты и обсуждения. В качестве начального этапа работы была рассчитана равновесная геометрия элементарной ячейки нитрида хрома с ГЦК-структурой типа rock salt. Полученный параметр ячейки a = 4,22 хорошо согласуется с экспериментальными данными a = 4,14 [31].

Из кристаллической структуры были смоделированы двумерные (2D) элементарные ячейки с индексами поверхностей (100), (110) и (111). Данные ячейки просты по структуре и могут быть описаны как монослои соответствующих поверхностей. Однако на начальном этапе расчетов было установлено, что 2D CrN (110) расправляется (изначально он имел гофрированный вид, при этом векторы элементарной ячейки, расположенные в плоскости монослоя, становятся одинаковыми) и принимает геометрическую форму поверхности (100). Таким образом, минимизируется дипольный момент в системе и, как следствие, энергия. В связи с этим фактом дальнейшие расчеты ограничились изучением свойств оставшихся двух монослоев CrN (100) и CrN (111).

Для сравнения энергетической стабильности двумерного CrN рассчитывалась относительная энергия образования монослоя, приходящаяся на формульную единицу, по следующей формуле:

$$E = E_m/n_m - E_b/n_b \quad (1)$$

где E_m – энергия элементарной ячейки монослоя; E_b – энергия элементарной ячейки объемной структуры; n_m и n_b – число формульных единиц в элементарной ячейке монослоя и объемного материала.

Относительные энергии образования монослоев составили 0,99 и 1,1 eV для CrN (100) и CrN (111) соответственно.

В качестве первого типа монослоя был рассмотрен 2D CrN (100). Длина связи Cr–N составила в нем 1,98 Å, что на 6,2 % короче по сравнению с теоретически рассчитанным кристаллическим нитридом хрома. Полученный монослой является идеально плоским и представляет собой срез элементарной ячейки CrN типа NaCl. Для дальнейшего установления наиболее вероятного магнитного состояния были проделаны спин-поляризованные расчеты полной энергии двух магнитных конфигураций, а именно, ферромагнитного (FM) и антиферромагнитного (AFM) состояний. При этом суперячейка CrN (100) содержала 2×2 элементарных ячейки монослоя. Из значений энергии видно, что состояние AFM находится на 1,25 eV выше по энергетической шкале, чем FM. Это означает, что монослой CrN является ферромагнетиком. На рис. 1 показано распределение спиновой плотности для FM- и AFM-конфигураций.

В обоих случаях большая часть спиновой плотности скапливается вокруг Cr^{2+}. Также небольшая часть концентрируется вокруг положений ионов азота в случае ферромагнитного состояния.

Чтобы исследовать электронные свойства двумерного нитрида хрома, были проделаны спин-поляризованные расчеты зонной структуры и плотности состояний ферромагнитного состояния CrN (100) (рис. 2).

Полученные результаты показывают, что переход к предельному случаю тонкой пленки – монослою, влечет существенные изменения в свойствах материала. Так, антиферромагнитный при T < 270 K объемный CrN переходит в ферромагнитный полуметалл со 100 % спиновой поляризацией. Из плотности состояний также хорошо видно, что уровень Ферми преимущественно сформирован d-орбиталями атомов хрома. Они определяют валентную зону и зону проводимости в монослое. Для электронов со спином α наблюдается ненулевая плотность на уровне Ферми, а для электронов со спином β наблюдается запрещенная зона (2,01 eV). Получившийся в результате расчета магнитный момент на атоме Cr равен 3,27 $\mu_в$ и сопоставим с экспериментальными данными Ибберсона и Цивински (3,17 $\mu_в$) для кристалла [7].

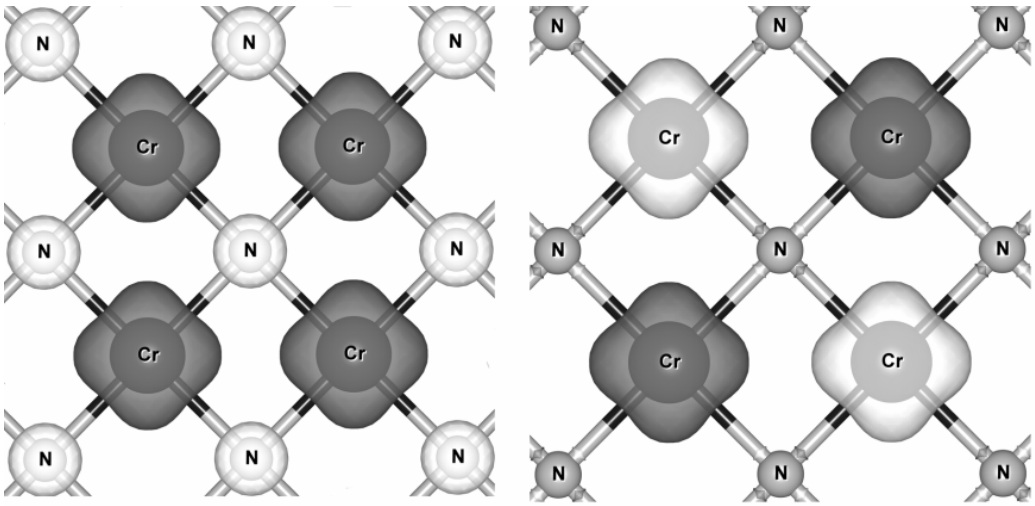


Рис. 1. Оптимизированная геометрия и распределение спиновой плотности в монослое CrN (100): *а* – FM; *б* – AFM

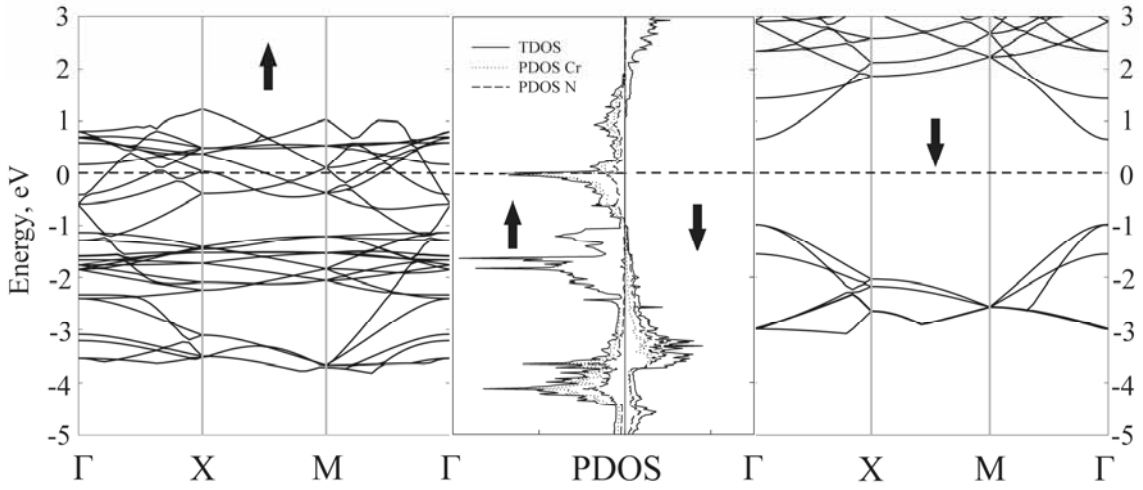


Рис. 2. Зонная структура и парциальные плотности состояний 2D CrN (100): стрелками указаны разные направления спинов электронов. Уровень Ферми соответствует 0 eV

Гамильтониан 2D-решетки CrN (100) может быть описан в соответствии с моделью Гейзенберга

$$\hat{H} = -\sum_{i,j} J\hat{m}_i\hat{m}_j, \qquad (2)$$

где $\hat{m}_i$ – магнитные моменты (в μ_B) в положении i (каждая элементарная ячейка рассматривается как единичное положение, и каждому положению соответствует два спиновых состояния, а именно, $S = 1$ и $S = -1$); J соответствует параметру Гейзенберга для прямого обмена, который может быть получен как

$$J = \left(\frac{1}{16}\right)E_{ex} / 2m^2,$$

где E_{ex} представляет энергию обмена состояний AFM и FM в суперячейке. Факторы 1/16 и 1/2 соответствуют 16 обменным парам в суперячейке и двойному учету каждой пары при суммировании. Здесь E_{ex} = 1250 meV и m = 2. Таким образом, J = 4,34 meV.

Полученное значение J сопоставимо с параметрами J в других работах, связанных с двумерными структурами [15; 32]. Вероятно, в данном случае точка Кюри будет высокой, что соответствует возможности существования нового двумерного высокотемпературного ферромагнетика.

Вторым типом двумерной структуры был монослой нитрида хрома с индексом поверхности (111). В ходе оптимизации геометрии было установлено, что монослой имеет плоское строение. Это можно объяснить стремлением материала минимизировать энергию путем уменьшения до нулевого значения дипольного момента системы, который, очевидно, появился бы в случае гофрированной поверхности. Данный эффект схож с описанным ранее для 2D CrN (110). Расправление гофрированной поверхности привело к увеличению вектора трансляции со значения 2,98 Å для случая монослоя, полученного из элементарной периодической ячейки CrN, до 3,25 Å для плоской структуры.

Как и в случае CrN (100), монослой является ферромагнетиком. Большая часть спиновой плотности скапливается вокруг Cr^{2+} (рис. 3).

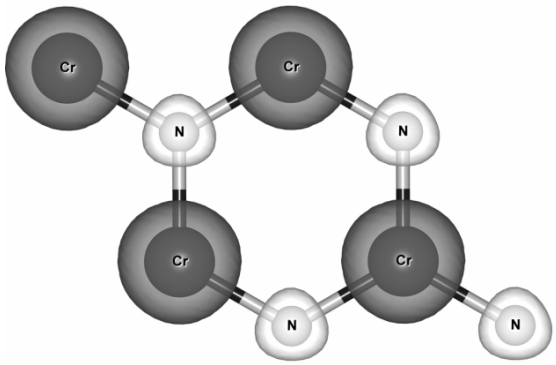


Рис. 3. Оптимизированная геометрия и распределение спиновой плотности в монослое CrN (111)

На рис. 4 представлены зонная структура и плотности состояний монослоя CrN (111). Исходя из результатов расчета электронной структуры, можно отметить, что данный двумерный материал также является полуметаллом и обладает 100 % спиновой поляризацией. В плотности состояний для электронов со спином α наблюдается ненулевая плотность, а для электронов со спином β наблюдается запрещенная зона (3,95 eV).

На следующем этапе работы необходимо было проверить зависимость изменения свойств от увеличения числа слоев. Для этого были проделаны спин-поляризованные расчеты бислойных моделей CrN (100) и CrN (111) (рис. 5).

Полученные результаты указывают на небольшие изменения в плотностях состояний. Однако основные свойства, такие как ферромагнетизм и 100 % спиновая поляризация, сохраняются. Геометрически бислой (111) становится слегка гофрированным. Вероятно, с последующим увеличением числа слоев пленки гофрирование будет усиливаться вплоть до достижения значения, характерного для объемной структуры.

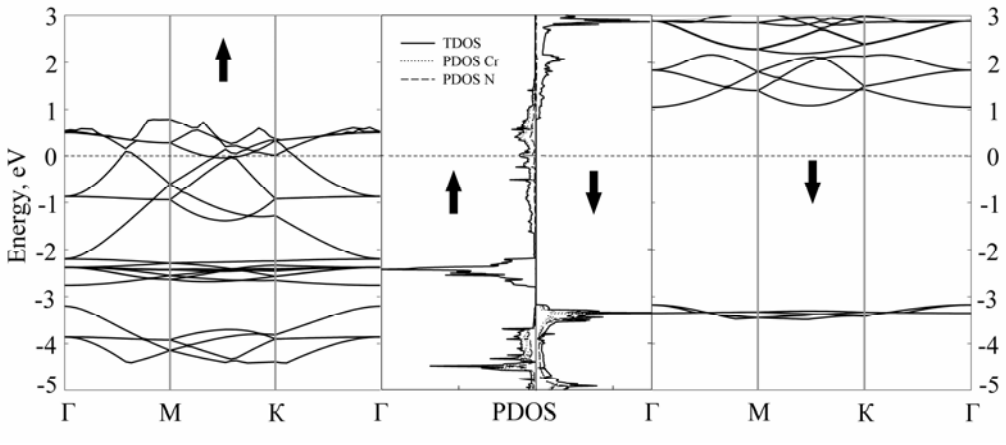


Рис. 4. Зонная структура и парциальные плотности состояний 2D CrN (111):
стрелками указаны разные направления спинов электронов. Уровень Ферми соответствует 0 eV

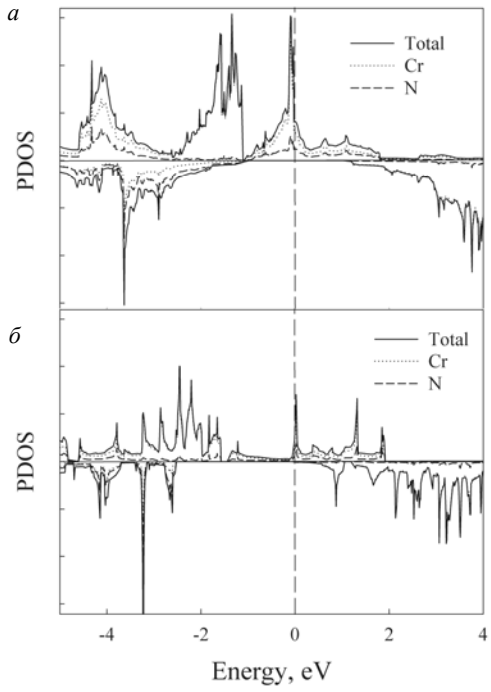


Рис. 5. Парциальные плотности состояний бислоев:
а – CrN (100); *б* – CrN (111). Шкалы PDOS в обоих случаях одинаковы

Таким образом, все исследованные монослои обладают полуметаллической проводимостью и сохраняют свои свойства при переходе к бислоям.

Заключение. С целью предсказания существования нового двумерного материала были исследованы геометрия, относительная стабильность и электронная структура монослоев нитрида хрома. Было обнаружено, что типичный антиферромагнитный материал в объемной фазе может приобретать ферромагнитное упорядочение в случае моно- и бислойной толщины. Ферромагнитизм в данном случае, вероятно, связан с *p–d*-обменным взаимодействием. При этом больший вклад в уровень Ферми вносят *d*-орбитали атома хрома. Несмотря на существенные изменения геометрии, при переходе от объемного материала к монослоям их относительная стабильность остается высокой.

Таким образом, высокая стабильность, ферромагнетизм и 100 % спиновая поляризация делают данный материал перспективным для использования в спинтронике.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Сибирскому суперкомпьютерному центру СО РАН (Новосибирск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), а также НИВЦ МГУ «Лаборатория параллельных информационных технологий» [25] (система СКИФ МГУ «Чебышев») за предоставленные возможности использования вычислительных кластеров, на которых были проведены расчеты.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования Сибирскому федеральному университету (грант № 16.1500.2014/K).

Acknowledgements. The authors would like to thank Siberian Supercomputer Center (SSCC) of SB RAS, Novosibirsk; and Laboratory of Parallel Information Technologies [25] of Research Computing Center of Moscow State University (the SKIF MSU "Chebyshev" system) for providing the access to their supercomputers.

This work was supported by the government contract of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation to Siberian Federal University (grant № 16.1500.2014/K).

References

1. Zhou X., Chen H., Shu D., He C., Nan J. Study on the electrochemical behavior of vanadium nitride as a promising supercapacitor material. *J. Phys. Chem. Solids.*, 2009, Vol. 70, P. 495–500.

2. Siegel D. J., Hector L. G., Adams J. B. First-principles study of metal–carbide/nitride adhesion: Al/VC vs. Al/VN. *Acta Mater.*, 2002, Vol. 50, P. 619−631.

3. Toth L. E., Transition Metal Carbides and Nitrides. New York, Academic, 1971, 279 p.

4. Bhobe P. A., Chainani A., Taguchi M., Takeuchi T., Eguchi R., Matsunami M., Ishizaka K., Takata Y., Oura M., Senba Y., Ohashi H., Nishino Y., Yabashi M., Tamasaku K., Ishikawa T., Takenaka K., Takagi H., Shin S. Evidence for a Correlated Insulator to Antiferromagnetic Metal Transition in CrN. *Phys. Rev. Lett.,* 2010, Vol. 104, P. 236404.

5. Corliss L. M., Elliott N., Hastings J. M. Antiferromagnetic Structure of CrN. *Phys. Rev.,* 1960, Vol. 117, P. 929–935.

6. Miao M. S., Lambrecht W. R. L. Structure and magnetic properties of MnN, CrN, and VN under volume expansion. *Phys. Rev. B,* 2005, Vol. 71, P. 214405.

7. Browne J. D., Liddell P. R., Street R., Mills T. An investigation of the antiferromagnetic transition of CrN. *Phys. Status Solidi A,* 1970, Vol. 1, P. 715–723.

8. Ibberson R. M. and Cywinski R. The magnetic and structural transitions in CrN and (CrMo)N. *Physica B,* 1992, Vol. 180–181, P. 329–332.

9. Eddine M. N., Sayetat F., Felix E., Hebd C. R. *Seances Acad. Sci., Ser. B,* 1969, 269, P. 574–577.

10. Herle P. S., Hedge M. S., Vasathacharya N. Y., Philip S.,. Rao M. V. R, Sripathi T. Synthesis of TiN, VN, and CrN from Ammonolysis of TiS_2, VS_2, and Cr_2S_3. *J. Solid State Chem.,* 1997, Vol. 134, P. 120–127.

11. Constantin C., Haider M. B., Ingram D., Smith A. R. Metal/semiconductor Phase Transition in Chromium Nitride (001) Grown by rf-Plasma-assisted Molecular Beam Epitaxy. *Appl. Phys. Lett.,* 2004, Vol. 85, P. 6371–6373.

12. Glaser A., Surnev S., Ramsey M.G., Lazar P., Redinger J., Podloucky R., Netzer F.P. The growth of epitaxial VN(111) nanolayer surfaces. *Surf. Sci.,* 2007, Vol. 601, P. 4817–4823.

13. Lazar P., Rashkova B., Redinger J., Podloucky R., Mitterer C., Scheu C., Dehm G. Interface structure of epitaxial (111) VN films on (111) MgO. *Thin Solid Films,* 2008, Vol. 517, P. 1177–1181.

14. Inumaru K., Koyama K., Imooka N., Yamanaka S. Controlling the structural transition at the Néel point of CrN epitaxial thin films using epitaxial growth. *Phys. Rev. B,* 2007, Vol. 75, P. 054416.

15. Zhang Z., Liu X., Yakobson B. I., Guo W. Two-dimensional tetragonal TiC monolayer sheet and nanoribbons. *J. Am. Chem. Soc.,* 2012. Vol. 134, P. 19326 (9).

16. Zhang R.-Q., Kim C.-E., Delley B., Stampfl C., Soon A. A first-principles study of ultrathin nanofilms of MgO-supported TiN. *Phys. Chem. Chem. Phys.,* 2012, Vol. 14, P. 2462–2467.

17. Bai Y., Deng K., Kan E. Electronic and magnetic properties of an AlN monolayer doped with first-row elements: a first-principles study. *RSC Adv.,* 2015, Vol. 5, P. 18352–18358.

18. Naguib M., Mashtalir O., Carle J., Presser V., Lu J., Hultman L., Gogotsi Y., Barsoum M. W. Two-Dimensional Transition Metal Carbides. *ACS Nano*, 2012, Vol. 6 (2), P 1322–1331.

19. Kuklin A. V., Kuzubov A. A., Eliseeva N. S., Tomilin F. N., Fedorov A. S., Krasnov P. O. Theoretical Investigation of the Structure and Properties of the VN(111) Monolayer on the MgO(111) Surface. *Physics of the Solid State,* 2014, Vol. 56, No. 2, P. 229–234.

20. Kresse G., Furthmuller J. Efficient iterative schemes for *ab initio* total-energy calculations using a plane-wave basis. *Phys. Rev. B,* 1996, Vol. 54., P. 11169–11186.

21. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas. *Phys. Rev. B,* 1964, Vol. 136, P. 864−871.

22. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev. A,* 1965, Vol. 140, P. 1177–1181.

23. Perdew P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Phys. Rev. Lett.,* 1996, Vol. 77, P. 3865–3868.

24. Anisimov V. I., Zaanen J., Andersen O. K. Band theory and Mott insulators: Hubbard U instead of Stoner I. *Phys. Rev. B.,* 1991, Vol. 44, P. 943–954.

25. Dudarev S. L., Botton G. A., Savrasov S. Y., Humphreys C. J., Sutton A. P. Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+U study. *Phys. Rev. B.,* 1998, Vol. 57, P. 1505–1509.

26. Herwadkar A., Lambrecht W. R. L. Electronic structure of CrN: A borderline Mott insulator. *Phys. Rev. B*., 2009, Vol. 79, P. 035125 (10).

27. Grimme S., Antony J., Ehrlich S., Krieg H. A. A consistent and accurate ab initio parametrization of density functional dispersion correction (DFT-D) for the 94 elements H-Pu. *J. Chem. Phys.* 2010, Vol. 132, P. 154104 (19).

28. Blochl P. E. Projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.,* 1994, Vol. 50, p. 17953−17979.

29. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.,* 1999, Vol. 59, P. 1758–1775.

30. Monkhorst H. J., Pack H. J. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B.,* 1976, Vol. 13, P. 5188–5192.

31. Wyckoff R. W. G. Crystal Structures. New York, Academic, 1963, 237 p.

32. Kan, M., Zhou, J., Sun, Q., Kawazoe, Y. and Jena P. The Intrinsic Ferromagnetism in a MnO_2 Monolayer. *J. Phys. Chem. Lett.,* 2013, 4, P. 3382–3386.

© Куклин А. В., Кузубов А. А., Денисов В. М., Ковалева Е. А., Шостак С. А., 2015

УДК 544.18

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 456–463

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ АТОМОВ ЛИТИЯ В КРЕМНИЙ

Н. С. Михалева[1*], А. А. Кузубов[1], З. И. Попов[2], А. Д. Еремина[1], М. А. Высотин[1]

[1]Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения
Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95
[2]Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com

Рассматривается процесс диффузии атомов лития в приповерхностные слои кремния (001). Расчеты выполнялись в рамках теории функционала плотности. Показано, что при малой концентрации лития на реконструированной поверхности кремния (001) энергия связи в подповерхностном слое ниже, чем на поверхности, что препятствует диффузии лития внутрь кристалла. Подобная ситуация существенно не меняется при увеличении температуры. Анализ частот перескока одиночных атомов лития с поверхности в приповерхностные слои показал, что в случае малых концентраций миграция атомарного Li будет осуществляться практически по одному пути реакции (из положения L-состояния, в котором литий находится в канале между димерами).

При концентрации лития в два монослоя, наоборот, диффузия в подповерхностные слои становится более предпочтительна. Поскольку при достижении концентрации в один монослой происходит изменение симметрии димеров, диффузия лития внутрь кристалла также облегчается вследствие увеличения плотности положений в каналах между димерами.

Таким образом, результат моделирования позволил объяснить причину экспериментального факта затруднения диффузии лития при прохождении через данную поверхность и определить пути возможной модификации поверхности, которая должна увеличить энергию связи атомов лития в приповерхностных состояниях при низких степенях заполнения им поверхности.

Ключевые слова: диффузия, литий, кремний, DFT.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 456–463

THEORETICAL STUDY OF LITHIUM ATOMS PENETRATION INTO SILICON

N. S. Mikhaleva[1*], A. A. Kuzubov[1], Z. I. Popov[2], A. D. Eremina[1], M. A. Visotin[1]

[1]Siberian Federal University, Institute of Nonferrous Metals and Materials
95, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation
[2]L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS
50, Akademgorodok Str., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com

The article deals with a theoretical investigation of lithium diffusion through silicon (001) surface within density functional theory formalism. It was shown that it is more energetically favorable for dilute lithium atoms to stay atop fully-relaxed silicon (001) surface than beneath it. This fact hampers the diffusion into the silicon crystal and the situation doesn't change significantly with increase in temperature. The frequencies of lithium atom hopping from the surface to the subsurface layers of silicon crystal were estimated. The analysis of frequencies for different transition paths indicates that in the case of dilute concentration Li atoms are likely to migrate through the surface from one type of sites (site L-located in channels between silicon dimers).

With increasing of lithium concentration up to 1 monolayer and further, the silicon (001) surface swaps the asymmetric dimers reconstruction model for symmetric, leading to doubling of number of the sites in between silicon dimers. After the concentration reaches 2 monolayers, the binding energy of Li atoms on the surface becomes less than binding energy beneath the surface, so the diffusion turns to be thermodynamically allowed.

As a result of the investigation, the ab-initio modeling puts light on the cause of experimentally observed decelerated lithium diffusion through silicon (001) surface and delivers an opportunity to determine possible techniques for surface modification, which will increase lithium atom binding energies in sites beneath silicon surface at low lithium concentrations.

Keywords: diffusion, lithium, silicon, DFT.

Введение. На данный момент анодным материалом нового поколения считается кремний, поскольку он имеет самую высокую теоретическую удельную емкость (4200 мАч/г), превышающую в несколько раз удельную емкость графита (372 мАч/г) [1–5]. Несмотря на это достоинство материала, процесс внедрения лития в кремний сопровождается большим изменением удельного объема, а также фазовыми переходами. После полного литирования кремний претерпевает объемное расширение до 300 % [2; 6; 7]. Изменение удельного объема приводит к механическим напряжениям и, как следствие, к полному разрушению материала [8–11]. Кроме того, кремний имеет низкий коэффициент диффузии для ионов лития [12; 13]. Эти недостатки препятствуют использованию кремния в батареях с большой удельной мощностью.

Многочисленные исследования тонких пленок кремния [14–16], кремниевых нанопроводов [17–19], наночастиц [20–22], нанотрубок [23–26] и пористых структур [27–33] показали неутешительные результаты при использовании их в качестве анодных материалов в литий-ионных аккумуляторах. Это влечет за собой необходимость исследовать кинетический и структурный факторы, которые могут служить причиной медленной диффузии лития и фазовых переходов.

Определение среднего времени пребывания адсорбированного атома на поверхности несет ценную информацию о кинетике его десорбции. В работе H. Kleine и др. [34] было определено среднее время пребывания адсорбированного лития на поверхности Si (001) и (111) в температурном интервале 800–1250 К. Полное время пребывания лития оказалось в 10 раз больше среднего времени пребывания на поверхности (001), что свидетельствует о предпочтительной диффузии лития в объем кремния через поверхность (001).

Также на сорбцию и диффузию лития, протекающие на поверхности кремния, значительное влияние может оказывать реконструкция поверхности. В теоретической работе [35] авторами было установлено, что при увеличении концентрации лития на поверхности Si (001) от 1/16 до одного монослоя происходит смена реконструкции поверхности (2×2) на (2×1). В то время когда при увеличении концентрации лития до двух монослоев реконструкция поверхности отсутствует. При этом среднее расстояние между литиями равно 3,309 Å, что соответствует расстояниям в кристалле. Кроме того, авторами работы [35] рассчитаны потенциальные барьеры переходов атома лития с поверхности Si (001) с реконструкцией (2×1) в приповерхностный слой и далее в объем, величины которых равны 0,88 и 0,50 эВ соответственно. Однако влияние большей концентрации лития на энергетические барьеры диффузии еще не было исследовано.

Целью данной работы явилось исследование влияния различной степени заполнения поверхности кремния (001) литием на параметры сорбции и диффузии.

Объекты и методы исследования. Исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [36–38] в рамках метода функционала плотности (DFT) [39; 40] с использованием базиса плоских волн и PAW-формализма [41; 42]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционого функционала PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей вандерваальсово взаимодействие [43]. Для нахождения переходного состояния и потенциальных барьеров при переходе атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (001) был применен метод упругой ленты (nudged elastic band) [44].

На начальном этапе работы была смоделирована элементарная кубическая ячейка кремния. При оптимизации ее геометрии для интегрирования по первой зоне Брюллюэна (1BZ) эта зона автоматически разбивалась на сетку 12 × 12 × 12, выбранную по схеме Монхорста–Пака [45]. Далее для изучения сорбции и диффузии атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (001) была смоделирована пластина кристаллографического направления (001) с реконструкцией обоих поверхностей c(4 × 2), которая представляет собой суперячейку 4 × 4 × 3 (a = 15,3724 Å, b = c = 21,54 Å). В процессе моделирования суперячейки кремния задавался вакуумный промежуток 27 Å 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 × 2 × 1. Толщина пластинки подбиралась исходя из значений поверхностной энергии. Для пластины кремния толщиной 15,3724 Å значение поверхностной энергии равнялось 151,6 мэВ/Å^2, что согласуется с рассчитанными другими авторами значениями 155,9 мэВ/Å^2 [46] и 149,2 мэВ/Å^2 [47].

Энергия обрезания плоских волн E_{cutoff} в расчетах была равна 245,3 эВ. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/Å.

Для определения наиболее выгодных позиций атома лития на поверхности и в приповерхностных слоях Si (001) были рассчитаны структуры с различным его расположением (рис. 1).

Расчет энергии связи атома лития с поверхностью Si (001) (табл. 1) реализовывался по формуле

$$E = (E_{\text{SiLi}} - E_{\text{Si(001)}} - nE_{\text{Li}})/n, \qquad (1)$$

где E_{SiLi} – полная энергия системы Si (001) с адсорбированным атомом лития; $E_{\text{Si(001)}}$ – полная энергия суперячейки кремния с реконструированными поверхностями (001); E_{Li} – энергия одного атома лития в его кристаллической решетке; n – количество атомов лития.

Обсуждение полученных результатов. Согласно табл. 1 наиболее энергетически выгодными положениями атома лития является T3, когда он находится в канале между димерами кремния (рис. 1), что согласуется с другими теоретическими данными [48]. Стоит отметить, что при продвижении лития в объем (положения

UD, UH, UH2, UB2, U) или выходе из канала на поверхность (положения HB, TD) энергия связи атома лития с кремнием уменьшается. Таким образом, можно сделать вывод о предпочтительном первоначальном расположении атомов лития в канале между димерами кремния.

Для подтверждения данного факта в работе были смоделированы переходы атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (001). Полученные в ходе расчетов величины потенциальных барьеров различных переходов атома лития представлены в табл. 2.

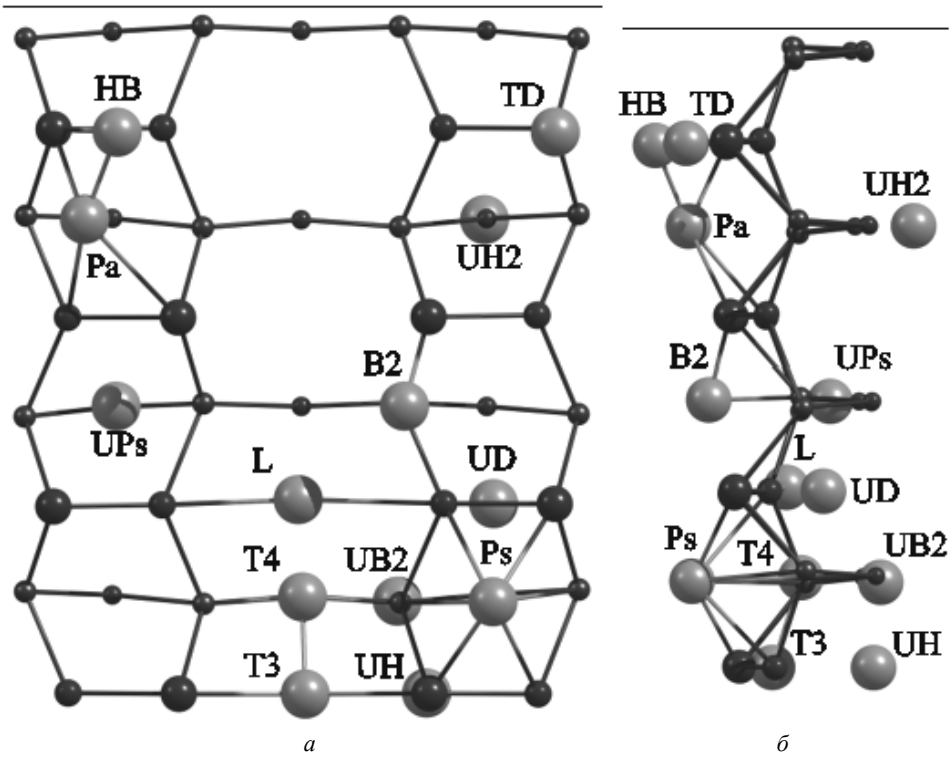


Рис. 1. Различные положения атома лития на поверхности и в приповерхностных слоях Si (001) (темным цветом обозначены атомы кремния, светлым – атомы лития):
а – вид сверху, *б* – вид сбоку

Таблица 1

Величины энергии связи атома лития с поверхностью Si (001) в зависимости от его расположения

Положение атома лития		Энергии связи атома лития с поверхностью Si (001), эВ
Поверхностные	T3	–1,240
	L	–1,177
	T4**	–1,160
	Ps	–1,045
	B2	–1,045
	Pa*	–1,040
	HB	–0,518
	TD	–0,517
Приповерхностные	UPs	–1,037
	UH	–0,810
	UB2	–0,809
	U	–0,793
	UH2	–0,761
	UD	-0,110

Примечание. *Атом лития переходит в положение Ps; **атом лития переходит в положение T3.

Таблица 2

Величина потенциального барьера перехода атома лития по поверхности и в приповерхностных слоях Si (001)

Направление миграции		Значение потенциального барьера перехода атома лития, эВ	
		в прямом направлении	в обратном направлении
По поверхности	T3→L	0,43	0,37
	L→Ps	0,44	0,31
С поверхности в приповерхностные слои	T3→UH	1,22	0,79
	Ps→UH	2,46	2,23
	L→U	0,89	0,52
В приповерхностных слоях	UH→UB2	0,78	0,85
	UH→UD	0,84	0,13
	U→UB2	0,76	0,76

Как видно из табл. 2, миграция лития по поверхности осуществляется довольно легко. Однако продвижение атома лития с поверхности в приповерхностные слои затруднено, что обусловлено высокими потенциальными барьерами перехода. Следовательно, атому лития выгоднее оставаться в исходном поверхностном сорбционном состоянии. Также стоит обратить внимание на уменьшение потенциальных барьеров миграции атома лития в приповерхностных слоях. При этом величина барьера уже сопоставима с рассчитанным 0,85 эВ (для кубической ячейки кремния, состоящей из 64-х атомов) и экспериментальным 0,8 эВ [49] значениями барьера миграции лития в объеме кремния.

При малой концентрации атомов лития можно выделить два пути перехода атома лития с поверхности в приповерхностные слои:

1) T3 → UH → UB2, обозначим как [T3 → UB2];

2) L → U → UB2, обозначим как [L → UB2].

Начальными положениями атома лития на поверхности кремния считаются T3 и L, между которыми также возможен перескок с энергией активации 0,43 эВ в прямом и 0,37 эВ в обратном направлении. При этом полная энергия системы, когда атом лития находится в положении T3, на 0,063 эВ ниже, а барьеры проникновения под слой лития T3 → UH и L → U составляют величину намного большую, чем скачки по поверхности. Схематическое изображение движение атома лития представлено на рис. 2.

Распределение Гиббса для положений лития T3 и L рассчитано по формуле

$$w(E_i) = \frac{e^{-\Delta E_i / k_b T}}{e^{-\Delta E(T3)/k_b T} + e^{-\Delta E(L)/k_b T}}, \qquad (2)$$

где k_b – постоянная Больцмана; T – температура, составляющая значения: w(T3) = 0,5157 и $w(L)$ = 0,4843.

Когда атом лития находится в положении UB2, считается, что он находится в объеме кремния, так как атом лития находится в тетраэдрической поре, как и в структуре кристаллического кремния.

Константы скорости перескока атомов лития между положениями X1 и X2 рассчитывались по уравнению

$$K(X1 \to X2) = A\exp\left(-\frac{E_b}{k_b T}\right), \qquad (3)$$

где

$$A = \frac{k_b T}{h}, \qquad (4)$$

k_b – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; T – температура.

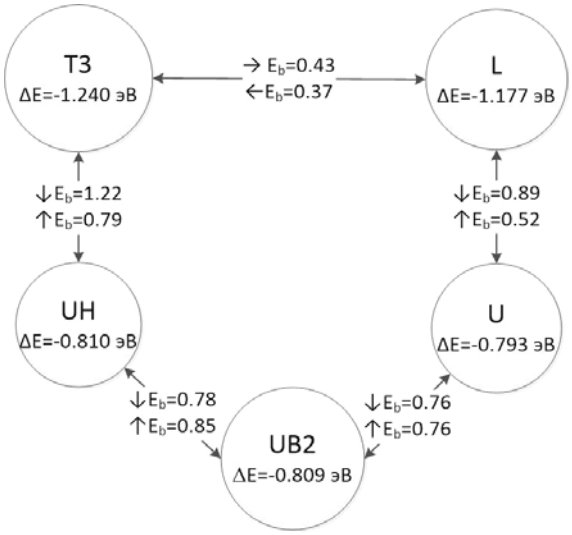


Рис. 2. Схематическое изображение путей движения атома лития с поверхности в объем кремния

Расчет вероятности перескока в прямом направлении определялся как

$$p(X1 \to X2) = \frac{K(X1 \to X2)}{K(X2 \to X1)}. \qquad (5)$$

Для сравнения были выбраны четыре пути прохождения атома лития вглубь поверхности кремния:

$$[\mathrm{L} \to \mathrm{UB2}] = w(\mathrm{L})\, p(\mathrm{L} \to \mathrm{U})\, p(\mathrm{U} \to \mathrm{UB2}), \qquad (6)$$

$$[\mathrm{T3} \to \mathrm{UB2}] = w(\mathrm{T3})\, p(\mathrm{T3} \to \mathrm{UH})\, p(\mathrm{UH} \to \mathrm{UB2}). \qquad (7)$$

А отношение вероятности перехода к сумме всех возможных переходов вычислялось как

$$P_1\{[\mathrm{L} \to \mathrm{UB2}]\} = \frac{[\mathrm{L} \to \mathrm{UB2}]}{\sum[X1 \to X2]}, \quad (8)$$

$$P_2\{[\mathrm{T3} \to \mathrm{UB2}]\} = \frac{[\mathrm{T3} \to \mathrm{UB2}]}{\sum[X1 \to X2]}, \quad (9)$$

где сумма вероятностей прохождения по каждому из путей

$$\sum[X1 \to X2] = [\mathrm{L} \to \mathrm{UB2}] + [\mathrm{T3} \to \mathrm{UB2}]. \quad (10)$$

На рис. 3 представлены результаты зависимости вероятности перескока лития от пути и температуры.

При использовании кремния в качестве анодного материала все процессы протекают при температурах, не превышающих 400 К, поэтому из приведенных на рис. 3 зависимостей следует, что предпочтительным путем миграции атома лития из электролита в положение UB2 будет, вероятнее всего, путь L → U → UB2.

Далее нами было выдвинуто предположение, что уменьшение потенциальных барьеров перехода атома лития в объем кремния будет происходить при большей степени заполнения поверхности. Поэтому в работе были рассмотрены структуры с большей степенью заполнения поверхности Si (001). Для моделирования структур с различной степенью заполнения поверхности литием преимущественно были выбраны его наиболее выгодные сорбционные положения T3, L, Ps (см. рис. 1).

Согласно полученным данным, энергия связи лития с поверхностью Si (001) в целом уменьшается при увеличении концентрации лития на поверхности (табл. 3). Это обусловлено образованием небольших кластеров лития (минимальное расстояние Li–Li составляет 2,75 Å), что согласуется с экспериментальными [50–52] и теоретическими данными [53; 54]. Стоит обратить внимание на то, что при увеличении концентрации лития на поверхности происходит смена антисимметричной модели димеров симметричной, данное явление наблюдали ранее и в экспериментальных работах [53; 54].

Для оценки влияния степени заполнения поверхности литием на его диффузию в объем кремния были рассчитаны потенциальные барьеры переходов T3–UH и L–U для структур с различной концентрацией лития на поверхности (табл. 4). Для структур с симметричной моделью димеров эти два перехода являются эквивалентными.

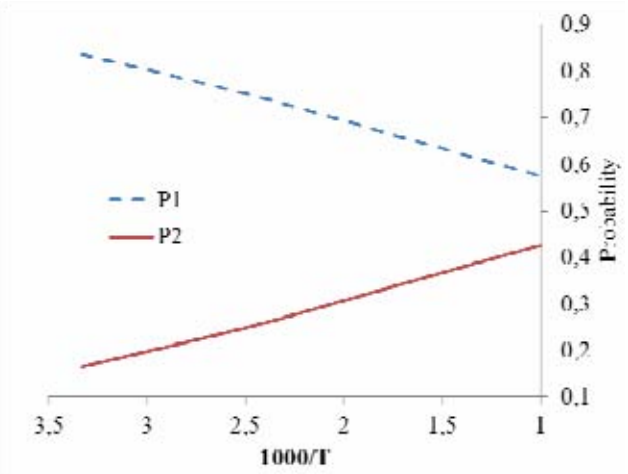


Рис. 3. Зависимость вероятности перескока лития от пути и температуры

Таблица 3

Величины энергии связи лития с поверхностью Si (001) в зависимости от его расположения и степени заполнения поверхности литием

Положения атомов лития	Доля заполнения поверхности, ML (монослой)	Энергия связи, приходящаяся на один атом лития, эВ
L*	0,25	–0,989
T3*	0,25	–0,996
Ps*	0,50	–0,778
T3, L*	0,50	–0,936
T3, Ps*	0,75	–0,990
L, Ps*	0,75	–0,990
T3, L, Ps**	1,00	–1,084
T3, L, Ps, HB**	1,50	–0,564
T3, L, Ps, 0.5TD**	1,50	–0,518
T3, L, Ps, TD**	2,00	–0,454

Примечание. * Антисимметричная модель димеров; ** симметричная модель димеров.

Таблица 4

Величина потенциального барьера перехода T3–UH и L–U атома лития в Si (001) в зависимости от степени заполнения поверхности литием

Положения соседних атомов лития в системе	Доля заполнения поверхности, ML (монослой)	Значение потенциального барьера перехода атома лития, эВ	
		в прямом направлении	в обратном направлении
T3 (один атом, T3–UH)	0,03	1,22	0,79
L (один атом, L–U)	0,03	0,89	0,52
T3, L (T3–UH)	0,50	1,39	0,61
T3, L (L–U)	0,50	0,88	0,71
T3, Ps (T3–UH)	0,75	1,07	0,84
L, Ps (T3–UH)	0,75	1,09	0,85
T3, L, Ps (T3–UH)	1,00	1,02	0,68
T3, L, Ps, HB (T3–UH)	1,50	0,98	0,72
T3, L, Ps, TD (T3–UH)	2,00	0,99	1,10

Как видно из табл. 4, с повышением концентрации лития на поверхности Si (001) энергетические барьеры перехода с поверхности в объем в целом уменьшаются. Это объясняется тем, что начиная с конфигурации T3, L, Ps с симметричной моделью димеров, на поверхности происходит усреднение начальных состояний T3 и L, приводящее к появлению нового, менее стабильного состояния (энергия связи –1,084 эВ). Также стоит отметить, что при меньших концентрациях (< 0,75 монослоя) незначительные изменения барьера могут быть связаны с перестройкой димеров на поверхности. Необходимо обратить внимание и на то, что при достижении концентрации лития на поверхности в два монослоя энергетический барьер миграции лития с поверхности в объем немного ниже (на 0,11 эВ), ввиду большей энергетической стабильности объемного состояния, чем поверхностной. Следовательно, начнет преобладать диффузия лития в объем.

Заключение. Результаты проведенных расчетов показывают, что при относительно малых концентрациях лития на реконструированной поверхности кремния (001) миграция одиночных атомов лития в объем оказывается маловероятной, поскольку его положения в приповерхностных слоях оказываются менее выгодными по сравнению с поверхностными состояниями. При этом величина потенциального барьера перескока атома лития с поверхности в приповерхностный слой при температурах эксплуатации литиевых элементов будет соответствовать барьеру лимитирующей стадии, а именно, пути миграции L–UB2. Его величина немного превышает аналогичное значение для величины перескока одиночного атома лития в периодическом кристалле кремния (0,89 и 0,85 эВ соответственно). При заполнении поверхности кремния двумя слоями лития мы имеем предпосылки с точки зрения термодинамических показателей для перехода атома лития вглубь, поскольку в данном случае стабилизируется положение атома лития в приповерхностном слое. Одновременно с увеличением заполнения поверхности литием меняется реконструкция поверхности кремния и начинает преобладать симметричная модель димеров, что приводит к тому, что возможные пути миграции в объем (T3 → UH и L → U) становятся эквивалентными, и в результате приводит к увеличению числа возможных переходов. Таким образом, квантово-химическое моделирование объясняет экспериментальный факт затрудненной диффузии лития на первых этапах процесса, связанного с преодолением поверхности.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 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 «Лаборатория параллельных информационных технологий» (система СКИФ МГУ «Чебышев») [55] 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 Technologies21 of Research Computing Center of Moscow State University (the SKIF MSU “Chebyshev” system [55]) for providing the access to their supercomputers.

References

1. Nikolaev V. P., Morachevskii A. G., Demidov A. I., Bairachnyi E. V. Thermodynamic properties of solid alloys of lithium-silicon. *Russ. J. Appl. Chem*. 1980, Vol. 53 (9), P. 1549−1551.

2. Boukamp B. A., Lesh G. C., Huggins R. A. All-Solid Lithium Electrodes with Mixed-Conductor Matrix. J. Electrochem. Soc. 1981, Vol. 128, P. 725–729.

3. Okamoto H. The Li-Si (Lithium-Silicon) system. *Journal of Phase Equilibria*. 1990, Vol. 11, P. 306.

4. Obrovac M. N. Christensen L. Structural changes in silicon anodes during lithium insertion/extraction. *Electrochim. Solid-State Lett.* 2004, Vol. 7, P. A93–A96.

5. Kasavajjula U., Wang C., Appleby A. J. Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells. *J. Power Sources*. 2007, Vol. 163, P. 1003–1039.

6. Huggins R. A. Lithium alloy negative electrodes. *J. Power Sources*. 1999, Vol. 81–82, P. 13–19.

7. Beaulieu L. Y., Eberman K. W., Turner R. L., Krause L. J., Dahn J. R. Colossal Reversible Volume Changes in Lithium Alloys. *Electrochem. Solid-State Lett*. 2001, Vol. 4, P. A137–A140.

8. Anani A., Crouch-Baker S., Huggins R. A. Kinetic and Thermodynamic Parameters of Several Binary Lithium Alloy Negative Electrode Materials at Ambient Temperature. *Journal of the Electrochemical Society.* 1987, Vol. 134, P. 3098.

9. Wen C. J. Chemical diffusion in intermediate phases in the lithium-silicon system. *J. Sol. St. Chem*. 1981, Vol. 37, P. 271.

10. Li H., Huang X. J., Chen L. Q., Zhou G., Zhang Z., Yu D., Mo Y. J., Pei N. The crystal structural evolution of nano-Si anode caused by lithium insertion and extraction at room temperature. *Solid State Ionics.* 2000, Vol. 135, P. 181.

11. Besenhard J. O., Yang Y., Winter M. Will advanced lithium-alloy anodes have a chance in lithium-ion batteries. *J. Power Sources.* 1997, Vol. 68, P. 87.

12. Fedorov A. S., Popov Z. I., Kuzubov A. A., Ovchinnikov S. G. Theoretical study of the diffusion of lithium in crystalline and amorphous silicon. *JETP Letters*. 2012, Vol. 95, Iss. 3, P. 143–147.

13. Allen C. E., Beke D. L., Bracht H. *Group III: Condensed Matter.* 1997, No. 3, P. 2.

14. Takamura T., Ohara S., Uehara M., Suzuki J., Sekine K. A vacuum deposited Si film having a Li extraction capacity over 2000 mAh/g with a long cycle life. *J. Power Sources.* 2004, Vol. 129 (1), P. 96−100.

15. Yin J. T., Wada M., Yamamoto K., Kitano Y., Tanase S., Sakai T. Micrometer-Scale Amorphous Si Thin-Film Electrodes Fabricated by Electron-Beam Deposition for Li-Ion Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 2006, Vol. 153 (3), P. A472−A477.

16. Zhang Q., Zhang W., Wan W., Cui Y. Wang E. Lithium Insertion In Silicon Nanowires: An ab Initio Study. *Nano Lett.* 2010, Vol. 10, P. 3243−3249.

17. Chan C. K., Peng H. L., Liu G., McIlwrath K., Zhang X. F., Huggins R. A., Cui Y. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires. *Nat. Nanotechnol.* 2008, Vol. 3 (1), P. 31−35.

18. Peng K. Q., Jie J. S., Zhang W. J., Lee S. T. Silicon nanowires for rechargeable lithium-ion battery anodes. *Appl. Phys. Lett.* 2008, Vol. 93 (3), P. 033105−033107.

19. Liu X., Zhang H. L. Q., Zhong L., Liu Y., Zheng H., Wang J. W., Cho J.-H., Dayeh S. A., Picraux S. T., Sullivan J. P., Mao S. X., Ye Z. Z., Huang J. Y. Ultrafast Electrochemical Lithiation of Individual Si Nanowire Anodes. *Nano Lett.* 2011, Vol. 11 (6), P. 2251−2258.

20. Dimov N., Kugino S., Yoshio M. Carbon-coated silicon as anode material for lithium ion batteries: advantages and limitations. *Electrochim. Acta.* 2003, Vol. 48 (11), P. 1579−1587.

21. Kim H., Seo M., Park M.-H. A Critical Size of Silicon Nano-Anodes for Lithium Rechargeable Batteries. *J. Angew. Chem.,* Int. Ed. 2010, Vol. 49 (12), P. 2146−2149.

22. Chan C. K., Patel R. N., O'Connell M. J., Korgel B. A., Cui Y. Solution-Grown Silicon Nanowires for Lithium-Ion Battery Anodes. *ACS Nano.* 2010, Vol. 4, P. 1443–1450.

23. Park M. H., Kim M. G., Joo J., Kim K., Kim J., Ahn S., Cui Y., Cho J. Silicon Nanotube Battery Anodes. *Nano Lett.* 2009, Vol. 9 (11), P. 3844−3847.

24. Song T., Xia J., Lee J.-H., Lee D. H., Kwon M.-S., Choi J.-M., Wu J., Doo S. K., Chang H., Park W., Zang D. S., Kim H., Huang Y., Hwang K.-C., Rogers J. A., Paik U. Arrays of Sealed Silicon Nanotubes As Anodes for Lithium Ion Batteries. *Nano Lett.* 2010, Vol. 10 (5). P. 1710−1716.

25. Zhou S., Wang D. W. Unique Lithiation and Delithiation Processes of Nanostructured Metal Silicides. *ACS Nano.* 2010, Vol. 4 (11), P. 7014−7020.

26. Ng S. H., Wang J. Z., Wexler D., Konstantinov K., Guo Z. P., Liu H. K. Highly Reversible Lithium Storage in Spheroidal Carbon-Coated Silicon Nanocomposites as Anodes for Lithium-Ion Batteries. *Angew. Chem.,* Int. Ed. 2006, Vol. 45, P. 6896–6899.

27. Kim H., Han B., Choo J., Cho J. Three-Dimensional Porous Silicon Particles for Use in High-Performance Lithium Secondary Batteries. *Angew. Chem.,* Int. Ed. 2008, Vol. 47 (52), P. 10151−10154.

28. Yao Y., McDowell M.T., Ryu I., Wu H., Liu N., Hu L., Nix W. D., Cui Y. Interconnected Silicon Hollow Nanospheres for Lithium-Ion Battery Anodes with Long Cycle Life. *Nano Lett.* 2011, Vol. 11 (7), P. 2949−2954.

29. Wang X. L., Han W. Q. Graphene Enhances Li Storage Capacity of Porous Single-Crystalline Silicon Nanowires. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2010, Vol. 2 (12), P. 3709−3713.

30. Sun C. Y., Qin C., Wang C. G., Su Z. M., Wang S., Wang X. L., Yang G. S., Shao K. Z., Lan Y. Q., Wang E. B. Chiral Nanoporous Metal-Organic Frameworks with High Porosity as Materials for Drug Delivery. *Adv. Mater.* 2011, Vol. 23 (47), P. 5629.

31. Qu Y. Q., Liao L., Li Y. J., Zhang H., Huang Y., Duan X. F. Electrically conductive and Optically Active Porous Silicon Nanowires. *Nano Lett.* 2009, Vol. 9, P. 4539–4543.

32. Magasinski A., Dixon P., Hertzberg B., Kvit A., Ayala J., Yushin G. High-performance lithium-ion anodes using a hierarchical bottom-up approach. *Nat. Mater.* 2010, Vol. 9, P. 353–358.

33. Ge M., Rong J., Xin F., Zhou C. Porous doped silicon nanowires for lithium ion battery anode with long cycle life. *Nano Lett.* 2012, Vol. 12, P. 2318–2323.

34. Kleine H., Eckhardt M., Fick D. Mean residence time of Li atoms adsorbed on Si(100) and Si(111) surfaces. *Surface Science*. 1995, Vol. 329, P. 71.

35. 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.

36. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B.* 1993, Vol. 47, P. 558.

37. 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.

38. Kresse G., Furthműller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B.* 1996, Vol. 54, P. 11169.

39. Hohenberg H., Kohn W. Inhomogenius Electron Gas. *Phys. Rev. A*. 1964, Vol. 136, P. B864–B871.

40. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev. A*. 1965, Vol. 140, P. A1133–A1138.

41. Blochl P. E. Projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.* 1994, Vol. 50, P. 17953.

42. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method. *Phys. Rev. B.* 1999, Vol. 59, P. 1758–1775.

43. Grimme S. Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction. *J. Comp. Chem.* 2006, Vol. 27, P. 1787.

44. Henkelman G., Uberuaga B. P., Jonsson 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. 9901.

45. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B.* 1976, Vol. 13, P. 5188.

46. Battaglia C. Structure and stability of the Si (331)-(12 × 1) surface reconstruction investigated with first-principles density functional theory. *Physical Review B.* 2009, Vol. 80, P. 214102.

47. Stekolnikov A. A., Furthmüller J., Bechstedt F. Absolute surface energies of group-IV semiconductors: dependence on orientation and reconstruction. *Physical Review B.* 2002, Vol. 65, P. 115318.

48. Jung S. C., Han Y. K. Facet-dependent lithium intercalation into Si crystals: Si (100) vs. Si (111). *Physical Chemistry Chemical Physics.* 2011, Vol. 13, P. 21282–21287.

49. Bracht H., Stolwijk N. A. Diffusion in Si. Diffusion in Semiconductors. Springer Berlin Heidelberg, 1998, P. 16.

50. Johansson M.K.-J., Gray S. M., Johansson L. S. O. Low coverages of lithium on Si(001) studied with STM and ARUPS / M.K.-J. Johansson. *Phys. Rev. B.* 1996, Vol. 53, P. 1362.

51. Johansson L. S. O., Grehk T. M., Gray S. M., Johansson M., Flodström A. S. High resolution core-level spectroscopy study of low-coverage lithium adsorption on the Si(100)2 × 1 surface. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 1995, Vol. 97, P. 364.

52. Grehk T. M., Johansson L. S. O., Gray S. M., Johansson M., Flodström A. S. Absorption of Li on the Si(100)2×1 surface studied with high-resolution core-level spectroscopy. *Phys. Rev. B.* 1995, Vol. 52, P. 16593.

53. Shi H. Q., Radny M. W., Smith P. V. Atomic and electronic structure of the Si(0 0 1)2 × 1–Li chemisorption system at 1.0 monolayer coverage. *Surf. Sci.* 2005, Vol. 574, P. 233.

54. Ko Y.-J., Chang K. J., Yi J.-Y. Atomic and electronic structure of Li-adsorbed Si(100) surfaces. *Phys. Rev. B.* 1997, Vol. 56, P. 9575.

55. Voevodin V. V., Zhumatii S. A., Sobolev S. I., Antonov A. S., Bryzgalov P. A., Nikitenko D. A., Stefanov K. S., Voevodin Vad. V. [Practice supercomputer “Lomonosov”]. *Otkrytye sistemy.* 2012, No. 7, P. 36.

© Михалева Н. С., Кузубов А. А., Попов З. И., Еремина А. Д., Высотин М. А., 2015

УДК 620.197

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 464–469

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

А. Е. Михеев[1*], Т. В. Трушкина[2], А. В. Гирн[1], Д. В. Раводина[1]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]АО «Красноярский машиностроительный завод»
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29
[*]E-mail: michla@mail.ru

Для защиты деталей и узлов, изготовленных из алюминиевых сплавов, от коррозии применяют покрытия, полученные гальваническим методом, которые не всегда удовлетворяют требованиям по коррозионной стойкости. Данный метод имеет ряд недостатков, связанных с применением агрессивных электролитов (растворы сильных кислот), наличием дополнительных операций, предусматривающих подготовку поверхности (предварительное обезжиривание, травление), а также необходимостью в технологическом цикле наличия холодильного оборудования. В связи с этим существует необходимость в применении новых методов по защите алюминиевых сплавов от коррозии. Одним из перспективных методов нанесения защитных покрытий на алюминиевые сплавы является микродуговое оксидирование (МДО).

Для формирования покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами разработана принципиальная схема взаимосвязей технологических параметров процесса МДО со свойствами получаемых покрытий. С целью подтверждения теоретических предположений проведены исследовательские работы по определению закономерности влияния технологических режимов микродугового оксидирования на физико-механические свойства получаемых покрытий. Установлены закономерности влияния технологических режимов микродугового оксидирования на физико-механические свойства получаемых покрытий.

Выявлено, что скорость коррозии МДО-покрытий в условиях ускоренных испытаний составляет 0,088 мм/год, что в 5 раз ниже твердого анодно-оксидного покрытия 0,4175 мм/год, полученного гальваническим методом. По полученным данным расчетов и отношению к группам коррозионной стойкости можно судить о более высокой коррозионной стойкости МДО-покрытий в агрессивных средах по сравнению с покрытиями, полученными гальваническим методом.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, коррозия, защитное покрытие, микродуговое оксидирование.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 464–469

DEVELOPMENT OF THE FUNCTIONAL DIAGRAM OF INFLUENCE OF THE BASIC FACTORS OF THE MDO PROCESS ON THE PROPERTIES OF COATINGS

A. E. Miheev[1*], T. V. Trushkina[2], A. V. Girn[1], D. V. Ravodina[1]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]JSC “Krasnoyarsk Machine Building Plant”
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
[*]E-mail: michla@mail.ru.

To protect the parts and assemblies made of aluminum alloy, from corrosion, coatings are obtained by electroplating, which do not always meet the requirements for corrosion resistance. This method has several disadvantages associated with the use of aggressive electrolytes (solutions of strong acids), the presence of additional operations involving surface preparation (preliminary degreasing, etching), as well as the need for the availability of the technological cycle refrigeration. Therefore there is a need for new methods to protect aluminum alloys from corrosion. One of the promising methods of applying protective coatings on aluminum alloys is microarc oxidation (MAO)

To form a coating with the desired performance characteristics, the concept relationships MDO process parameters with the properties of the coatings was designed. To confirm the theoretical assumptions research works to identify patterns of influence of technological regimes micro-arc oxidation on the mechanical properties of the coatings were

made. The regularities of the influence of technological modes of micro-arc oxidation on the mechanical properties of the coatings was made.

It was found that the corrosion rate of MAO coatings in terms of accelerated tests is 0,088 mm / year, which is 5 times lower than the solid anode-oxide coating 0.4175 mm / yr, obtained by electroplating. The obtained data and calculations with respect to the groups of corrosion resistance can be judged on higher corrosion resistance MDO coatings in corrosive environments, as compared with coatings obtained by electroplating.

Keywords: aluminum alloys, corrosion, protective coating, microarc oxidation.

Введение. Микродуговое оксидирование – процесс формирования покрытий в высоковольтном режиме на поверхности металлов, находящихся в электролите. МДО-покрытия обладают уникальными физико-механическими свойствами [1–6]. Развитию теории микродугового оксидирования и исследованию свойств полученных покрытий посвящены работы многих ученых, таких как Г. А. Марков, Г. В. Маркова, А. Гюнтершульце, Г. Бетц, Б. С. Гизаттулин, И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, А. И. Мамаев, П. С. Гордиенко, В. А. Федоров и др. Направление работ данных авторов связаны с исследованием механизма формирования оксидных покрытий на различных электрохимических стадиях [7–11]. Влияние технологических режимов процесса микродугового оксидирования на прочность и коррозионную стойкость покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах, изучены недостаточно глубоко. Особый практический и научный интерес представляют содержание α- и γ-фаз, пористость, шероховатость, микротвердость и толщина полученного оксида, оказывающие основное влияние на получение высокопрочных коррозионно-стойких покрытий. В связи с вышеизложенным актуальной задачей является получение коррозионно-стойких покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками на алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования.

Разработка функциональной схемы. Микродуговое оксидирование является сложным многофакторным процессом. Влияние отдельных факторов на свойства и качество покрытий исследуется достаточно широко, уделяется особое внимание анодно-катодному режиму, который обеспечивает получение покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками (адгезия, микродвердость, прочность и износостойкость) [12–14].

Физико-химические и механические характеристики покрытий в значительной степени зависят от технологических режимов процесса (плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющих тока, напряжение, время обработки и температура электролита) микродугового оксидирования, состава и концентрации электролитов [15–17]. Для формирования покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами разработана принципиальная схема взаимосвязей технологических параметров процесса МДО-составов обрабатываемого материала и электролита со свойствами получаемых покрытий, представленная на рис. 1.

В качестве факторов, влияющих на свойства покрытий, как правило, выступают плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющих тока, состав электролита. Важной характеристикой процесса является плотность тока. Ее величина оказывает значительное влияние на скорость протекания физико-химических процессов на обрабатываемой поверхности и на эксплуатационные характеристики полученного оксидного слоя. Однако при достижении определенных значений плотности тока энергия локальных разрядов достигает величин, при которых начинает наблюдаться эффект кавитации. При чрезмерно больших плотностях тока кавитационное разбрызгивание может превысить массу образующегося оксида. Объясняется это тем, что энергия локальных разрядов достигает таких значений, что расплавленное пятно (капля) оксида не успевает закристаллизоваться и поэтому следующий разряд приходится на это же место. В таких случаях вся подведенная энергия концентрируется через малую площадь дна кратера, разрушая не только слой образовавшегося оксида, но и материал основы. Поэтому при обработке существует ограничение по максимальному значению плотности тока, которая для алюминиевых сплавов не должна превышать 50 А/дм^2 [11].

Большое значение для процесса имеет также и соотношение катодной и анодной составляющих тока. Гальваническое оксидирование всегда проводилось только при анодной поляризации. Позднее были выявлены факты формирования оксидно-гидроксидных слоев и при катодной поляризации, а поиск рациональных комбинаций анодной и катодной поляризаций привел к чрезвычайно перспективным процессам формирования покрытий при асимметричном переменном напряжении – анодно-катодным микродуговым процессам [18]. От анодных такие покрытия радикально отличаются рядом свойств и, главное, низкой, иногда полностью отсутствующей, пористостью слоя, прилегающего к основе.

В анодный полупериод процесса происходит рост оксидного покрытия, а в катодный полупериод возможно частичное растворение оксида и переход γ-$A1_2O_3$ в α-$A1_2O_3$ оксида за счет сохранения высокой температуры в канале пробоя, что повышает твердость покрытий, а следовательно, и износостойкость. Для формирования прочных коррозионно-стойких покрытий в силикатно-щелочном электролите обработку рекомендуется вести в интервале напряжений от 500 до 1000 В. Для обеспечения высокой коррозионной стойкости необходимо добиваться снижения пористости покрытия. В наружном слое возможно образование алюмосиликатов в виде муллита ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$), повышающих коррозионную стойкость, но снижающих поверхностную прочность покрытия. Анализ разработанных механизмов процессов при МДО алюминия в различных электролитах показал, что процесс вести целесообразнее в силикатно-

щелочном электролите состава KOH + Na_2SiO_3 [19]. В выбранном электролите в результате протекания электрохимических процессов образуется оксид кремния, который при нагреве с Al_2O_3 и другими оксидами металлов может дать тугоплавкие и термически стойкие вещества, не взаимодействующие с растворами большинства кислот и щелочей, которые будут способствовать повышению коррозионной стойкости получаемых покрытий. При микродуговом оксидировании в силикатно-щелочном электролите согласно механизму электрохимических процессов возможно образование покрытия, содержащего в своем составе фазу α-$A1_2O_3$, которая будет обусловливать износостойкость [19]. С целью подтверждения теоретических предположений проведены исследовательские работы по определению закономерности влияния технологических режимов микродугового оксидирования на физико-механические свойства получаемых покрытий.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных работ получения образцов микродуговым оксидированием в слабощелочном водном электролите были выбраны следующие режимы обработки: плотность тока от 10 до 50 А/дм^2, соотношение катодной и анодной составляющих тока *Ik*/*Ia* = 1–1,5.

На твердость покрытий оказывает влияние соотношение катодной и анодной составляющих тока. На рис. 2 и 3 представлена зависимость микротвердости от соотношения токовых составляющих и сравнительная диаграмма микротвердости твердого анодно-оксидного и МДО-покрытий. Твердость покрытия на сплаве АМг6, сформированного при плотности тока 40 А/дм^2 и соотношении *Ik*/*Ia* = 1,2, достигает 23 ГПа, что в 4,5 раза превышает твердые анодно-оксидные покрытия.

Увеличение твердости покрытий с ростом плотности тока происходит за счет повышения содержания модификации α-Al_2O_3 в покрытии, что подтверждают данные дифрактограмм на рис. 4 и график изменения количественного соотношения фазовых составляющих покрытия, представленный на рис. 5.

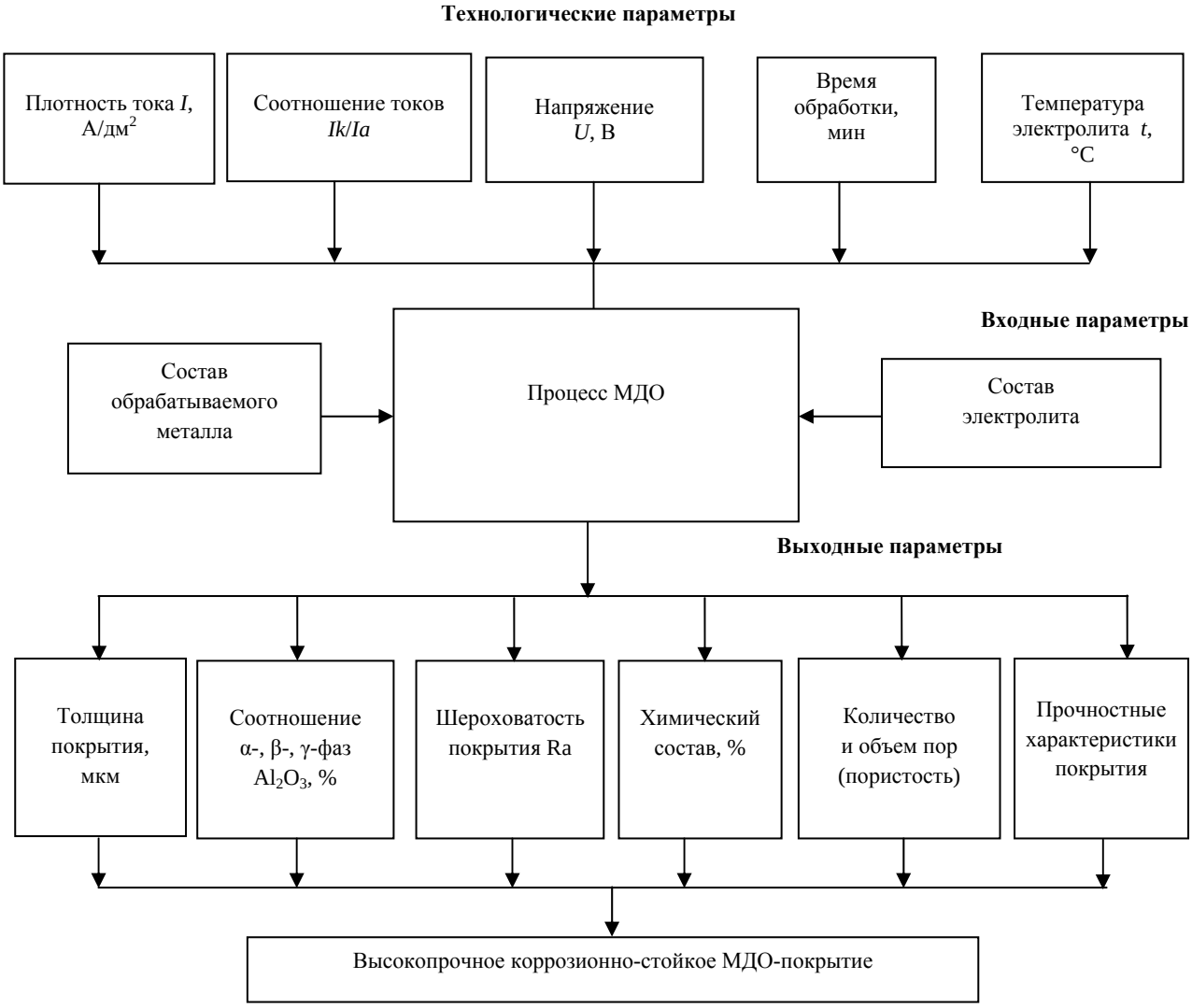


Рис. 1. Принципиальная схема взаимосвязей технологических параметров процесса МДО со свойствами получаемых покрытий

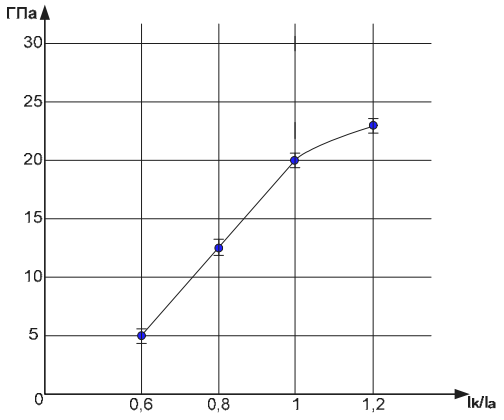


Рис. 2. Зависимость микротвердости от соотношения составляющих тока *Ik*/*Ia* при *Is* = 40 А/дм^2

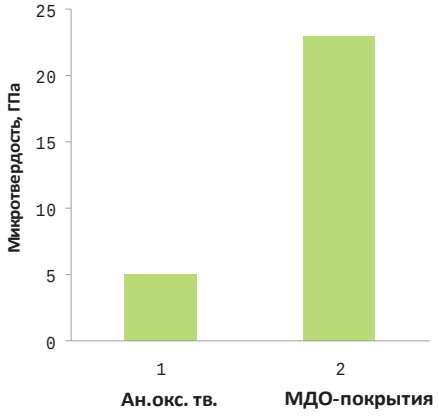


Рис. 3. Сравнительная диаграмма микротвердости твердого анодно-оксидного покрытия и МДО-покрытия при *Ik*/*Ia* = 1,2, *Is* = 40 А/дм^2

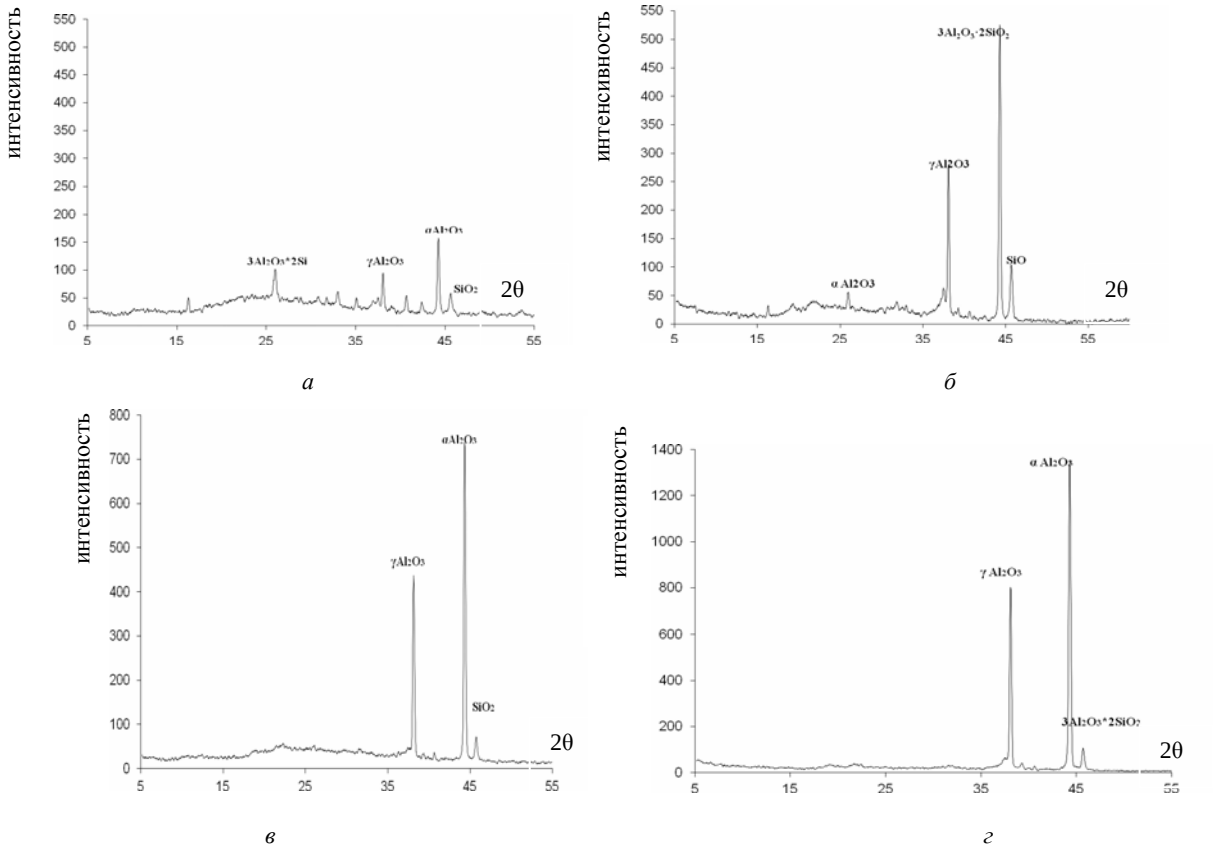


Рис. 4. Данные дифрактограмм образцов с МДО-покрытием при *Is* = 40 А/дм^2:
а – *Ik*/*Ia* = 0,6; *б* – *Ik*/*Ia* = 0,8; *в* – *Ik*/*Ia* = 1,0; *г* – *Ik*/*Ia* = 1,2

По результатам рентгенофазового анализа из данных дифрактограмм можно выделить две основные фазы оксида алюминия: альфа-фаза – характеризуется пиком интенсивности 2,045, гамма-фаза – 1,987. При увеличении катодной составляющей тока наблюдается увеличение содержания альфа-оксида алюминия в покрытии, интенсивность пиков от режимов обработки возрастает от 150 при *Ik*/*Ia* = 0,6 до 1400 при *Ik*/*Ia* = 1,2.

С увеличением соотношения *Ik*/*Ia* от 0,6 до 1,2 наблюдается повышение процентного содержания альфа- и гамма-оксидов алюминия в покрытии и достигает 17 % при *Ik*/*Ia* = 1,2, плотности тока *Is* = 40 А/дм^2.

Кроме высоких значений микротвердости, покрытия, сформированные микродуговым оксидированием, характеризуются также высокой прочностью сцепления $\sigma_{сц}$. Результаты испытаний МДО-покрытий с основой показали, что прочность сцепления превышает прочность используемой клеевой основы (клей ВК-9), которая выдерживает нагрузки до 10 МПа. Отрыв образцов происходит по клею, объясняется данный факт механизмом формирования покрытий. Покрытие при микродуговом оксидировании растет в глубину обрабатываемого материала, где образуется альфа-фаза оксида алюминия (что подтверждено данными рент-

генофазового анализа, представленными на рис. 4, 5) за счет высоких температур в канале пробоя.

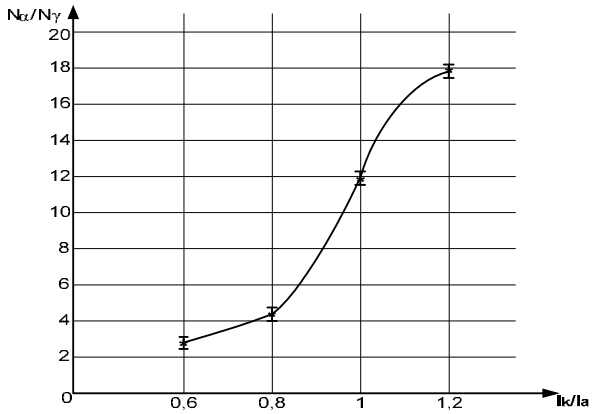


Рис. 5. Зависимость количественного соотношения N_α- и N_γ-фазовых составляющих Al_2O_3 от соотношения составляющих тока *Ik*/*Ia* при плотности тока *Is* = 40 А/дм^2

Испытания на износ (трением) показали, что износостойкость покрытий, сформированных микродуговым оксидированием на сплаве АМг6, в 20 раз превышает то же значение для закаленной стали У8 (HRC = 65).

Коррозионную стойкость образцов с МДО-покрытием и образцов с анодно-окисным покрытием оценивали в процессе ускоренных испытаний, которые проводились в условиях, вызывающих увеличение агрессивности среды: 1) Na_2SO_4 – 1 моль/литр, подкисленный H_2SO_4 до pH 2,5 и 2) 3% NaCl с добавлением NaOH pH 12,6. Время проведения испытаний – 14 суток.

Оценка покрытий по отношению к группам коррозионной стойкости осуществлялась по результатам расчета глубинного показателя коррозии согласно ГОСТ 5275–68.

По результатам проведенных расчетов скорости коррозии следует, что в разбавленной кислоте покрытие, сформированное микродуговым оксидированием, является более стойким по сравнению с покрытием, полученным классическим анодированием. Согласно шкале коррозионной стойкости МДО-покрытия относятся к группе весьма стойких, а анодно-окисные покрытия – к группе малостойких. В морской воде МДО-покрытия относятся к группе стойких, анодно-окисные покрытия – к группе с пониженной стойкостью. Выявлено, что скорость коррозии МДО-покрытий в условиях ускоренных испытаний составляет 0,088 мм/год, что в 5 раз ниже твердого анодно-оксидного покрытия 0,4175 мм/год, полученного гальваническим методом. По полученным данным расчетов и отношению к группам коррозионной стойкости можно судить о более высокой коррозионной стойкости МДО-покрытий в агрессивных средах по сравнению с покрытиями, полученными гальваническим методом.

Заключение. В работе предложена принципиальная схема взаимосвязей технологических параметров процесса МДО (плотности тока, соотношения катодной и анодной составляющих тока, напряжения, составов металла основы и электролита) со свойствами получаемых покрытий (шероховатостью, толщиной, содержанием фазовых составляющих оксида алюминия, химического состава, прочностных характеристик).

Установлены закономерности повышения физико-механических свойств полученных покрытий. При увеличении содержания (до 17 %) в составе покрытия α-Al_2O_3 микротвердость МДО-покрытий достигает 23 ГПа, что в 4,5 раза превышает значение микротвердости твердых анодно-оксидных покрытий. Выявлено, что скорость коррозии МДО-покрытий в условиях ускоренных испытаний в 5 раз ниже твердых анодно-оксидных покрытий, полученных гальваническим методом.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 2.G2531.0043.

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, the state contract № 2.G2531.0043.

Библиографические ссылки

1. Воробьева Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. 2 изд. пер. и доп. М. : Химия, 1975. 816 с.

2. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов (теоретические основы и их практические предложения). М. : Машиностроение,1962. 853 с.

3. Гольденберг И. Н. Техника защиты от коррозии. Л. : Химия, 1980. Вып. 2 (35). С. 15–19.

4. Розинфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. М. : Металлургия, 1969. 215 с.

5. Томашев Н. Д. Теория коррозии и защиты металлов. М. : Изд. АН СССР, 1959.

6. Гальванические покрытия в машиностроении : справочник. В 2 т. Т. 2 / Ф. Ф. Ажогин [и др.]. М. : Машиностроение, 1985. 248 с. : ил.

7. Шрейдер А. В. Оксидирование алюминия и его сплавов. М. : Машиностроение, 1960. 220 с.

8. Микродуговое оксидирование / Г. А. Марков [и др.] // Вестник МГТУ. Сер. «Машиностроение». 1992. № 1. С. 34–56.

9. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М. : Экомет, 2005. 368 с.

10. А. с. 526961 СССР, МКИ С 25 Д. Микродуговое оксидирование / Г. А. Марков, Т. А. Маркова, 1977. С. 14.

11. Модель перехода анодирования в микродуговой режим / В. И. Белеванцев [и др.] // Изв. СО АН СССР. Сер. «Хим. науки», 1989. Вып. 6. С. 73–81.

12. Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий в агрессивных средах // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1 (53). С. 179–184.

13. Малышев В. Н., Марков Г. А., Федоров В. А. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. № 1. С. 26–27.

14. Обобщенная модель микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев [и др.] // Перспективные материалы, технологии, конструкции : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. / КГАЦМиЗ. Красноярск, 2002. С. 136–141.

15. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник машиностроения. М., 2003. № 2. С. 56–63.

16. Михеев А. Е., Стацура В. В., Никушкин Н. В. Влияние параметров процесса МДО на формирование покрытий в электролитических растворах // Материалы, технологии, конструкции : сб. науч. тр. Красноярск, 1995. С. 144–146.

17. Федоров В. А., Белозеров В. В., Великосельская Н. Д. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 1. С. 87–93.

18. Тимошенко А. В., Опара Б. К. Влияние наложенного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме. М. : Машиностроение, 1994. 150 с.

19. Bartuśka M., Zvěrina K. Plazmově střikani povlakü ze zaruvzdorných kysličnikü a sloučenin // Strojirenstvi. 1973. Vol. 23, No. 11. P. 675–681.

References

1. Vorob’eva G. Ya. *Korrozionnaya stoykost' materialov v agressivnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv* [Material corrosion resistance in aggressive environments of chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1975, 816 p.

2. Evans Yu. R. *Korroziya i okislenie metallov (teoreticheskie osnovy i ikh prakticheskie predlozheniya)* [Corrosion and oxidation of metals (theoretical foundations and practical suggestions)]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1962, 853 p.

3. Gol’denberg I. N. *Tekhnika zashchity ot korrozii* [Equipment corrosion protection]. Leningrad, Khimiya Publ., 1980, No. 2 (35), P. 15–19.

4. Rozinfel’d I. L. *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and Protection of Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969, 215 p.

5. Tomashev N. D. *Teoriya korrozii i zashchity metallov* [Theory of Corrosion and Protection of Metals]. Moscow, Izd. AN SSSR Publ., 1959, 150 p.

6. Azhogin F. F. et al. *Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroenii.* [Electroplating in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, Vol. 2, 248 p.

7. Shreyder A. V. *Oksidirovanie alyuminiya i ego splavov* [Oxidation of aluminum and its alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1960, 220 p.

8. Markov G. A. et al. [Microarc oxidation]. *Vestn. MGTU. Ser. mashinostroenie*, 1992, No. 1, P. 34–56 (In Russ.).

9. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* [Microarc oxidation theory, technology, equipment]. Moscow, Ekomet Publ., 2005, 368 p.

10. Markov G. A., Markova T. A. *Mikrodugovoe oksidirovanie* [Microarc oxidation]. Patent SSSR, 1977, No. 526961, P. 14.

11. Belevantsev V. I. et al. [Model of transition anodizing microarc in the microarc mode]. *Izv. SO AN SSSR. Ser. khim. nauk*, 1989, Vol. 6, P. 73–81 (In Russ.).

12. Trushkina T. V. et al. [Corrosion resistance of MAO coatings in corrosive media]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 1 (53), P. 179–184 (In Russ.).

13. Malyshev V. N. et al. [Structure and properties of coatings applied by micro-arc oxidation]. *Khimich. i neftyanoe mashinostroenie*, 1984, No. 1, P. 26–27 (In Russ.).

14. Mikheev A. E. et al. [Generalized model of micro-arc oxidation of aluminum alloys]. *Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruktsii”* [Coll. scientific papers All-Russian scientific and technical conference “Advanced materials technology, design”]. Krasnoyarsk, KGATsMiZ, 2002, P. 136–141 (In Russ.).

15. Mikheev A. E. et al. [Technological capabilities micro-arc oxidation of aluminum alloys]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2003, No. 2, P. 56–63 (In Russ.).

16. Mikheev A. E. et al. [Effect of process parameters on the formation of MAO coatings in electrolytic solutions]. *Sb. nauchnykh trudov “Materialy, tekhnologii, konstruktsii”* [Coll. scientific papers “Materials, technology, desig”]. Krasnoyarsk, 1995, P.144–146 (In Russ.).

17. Fedorov V. A. et al. [Formation of hardened surface layers by micro-arc oxidation in various electrolytes and when changing current modes]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1991, No. 1, P. 87–93 (In Russ.).

18. Timoshenko A. V., Opara B. K. *Vliyanie nalozhennogo peremennogo toka na sostav i svoystva oksidnykh pokrytiy, formiruemykh v mikroplazmennom rezhime* [Influence of the superimposed AC on the composition and properties of oxide films formed in the microplasma regime]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994, 150 p.

19. Bartuśka M., Zvěrina K. Plazmově střikani povlakü ze zaruvzdorných kysličnikü a sloučenin. *Strojirenstvi*, 1973, Vol. 23, No. 11, P. 675–681.

© Михеев А. Е., Трушкина Т. В.,
Гирн А. В., Раводина Д. В., 2015

УДК 65.011.56

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 470–477

«ВИРТУАЛЬНЫЙ СЛИПП» – МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АГРЕГАТОМ СЛИПП И ЕЁ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ WinCC 7.0 и Step 7

Т. В. Пискажова[1], С. Б. Сидельников[1], В. М. Белолипецкий [2], П. Н. Якивьюк[1*], А. С. Сидельников[1]

[1]Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения
Российская Федерация, 660025, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95
[2]Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 55/44
[*]E-mail: PavelYakivyuk@yandex.ru

Процесс совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛИПП) целесообразно использовать для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов, из которых изготавливают электрические провода, заклепки, проволоку различного размера для выполнения сварочных работ в электротехнической и радиоэлектронной промышленности, а также в космическом машиностроении. Способ СЛИПП является перспективным направлением обработки металлов, позволяет существенно снизить трудо- и энергоемкость производства, однако его промышленное внедрение сдерживает в том числе и отсутствие алгоритмов автоматического управления. Особенно это важно для создающихся в настоящее время агрегатов СЛИПП, в состав которых входят различные узлы, обеспечивающие кристаллизацию и деформацию металла, его охлаждение, калибровку (при необходимости) и смотку готовых изделий в бухты.

Автоматическое управление должно обеспечить заданный расход металла, одинаковый во всех узлах агрегата, заданные значения температуры металла на входе и выходе из деформирующего узла, согласовать скорость вращения приемного намоточного устройства с расходом металла. Для этого необходимо создать математическую модель, реализовать её программно и визуализировать.

Проведена постановка задачи моделирования и представлена упрощенная математическая модель на основе обыкновенных дифференциальных уравнений для управления агрегатом совмещённого литья и прокатки-прессования для получения длинномерных изделий из алюминиевых сплавов.

Математическая модель для управления агрегатом СЛИПП реализована в программных продуктах WinCC 7.0 и Step 7 с применением языков программирования FBD и SCL. Разработана мнемосхема процесса, с помощью тегов реализована её связь с моделью. Приведено описание структуры программы в ПО Step 7, представлен вариант расчёта стационарного режима работы установки на мнемосхеме.

Ключевые слова: математическая модель, визуализация, программирование, литье, прокатка, прессование, агрегат СЛИПП.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 470–477

"VIRTUAL CC&RP" – A MATHEMATICAL MODEL FOR THE CONTROL OF THE UNIT CC&RP AND ITS VISUALIZATION WITH THE HELP OF SOFTWARE PRODUCTS WinCC 7.0 AND Step 7

T. V. Piskazhova[1], S. B. Sidelnikov[1], V. M. Belolipetskii[2], P. N. Yakivyuk[1*], A. S. Sidelnikov[1]

[1]Siberian Federal University, Institute of Nonferrous Metals and Materials Science
95, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation
[2]Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
55/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: PavelYakivyuk@yandex.ru

The Combined Casting and Rolled-Pressing Process (CC&RP) is used for electrotechnical-purposed aluminum rod production, which serves as half-stuff for manufacturing of different-sized aluminum wire, rivets, electrical and welding wire for electrical and radioelectronic industries. Depending on its properties, aluminum rod is widely used in the various industries, including space engineering. CC&RP method is a promising way of metal treatment, which is not yet widely implemented due to insufficiency of the automation algorithms.

Automated control should provide specified values of metal consumption, temperature at the rolling mill, temperature mode of pressing node, rod temperature at the matrix end, intake device rotational speed in respect to metal consumption. For this purpose, mathematical model development, as well as its programming realization and visualization are needed.

This paper provides statement of modeling task and simplified mathematical model of CC&RP method using the machine for aluminum lengthy products manufacturing. For each node of the machine ODEs is considered, that describes changes of process variables depending of time or coordinates. Initial conditions for each node input are determined from technological constants or previous node outputs.

Further, the CC&RP mathematical model is realized with WinCC 7.0 and Step 7 applications using FBD and SCL languages. The process mimic panel is developed and connected with the model. The description of the program structure in Step 7 and the version of machine stationary mode calculation are provided.

Keywords: mathematical model, visualization, programming, CC&RP.

Введение. На сегодняшний день в космическом машиностроении для работы узлов в реальных условиях эксплуатации необходимо применять детали из материалов, обладающих стойкостью к воздействию факторов космического пространства – высокого вакуума, перепадов температур, радиации и пр. Помимо этого немаловажными свойствами материалов остаются высокие удельные характеристики, технологичность, ценовая доступность. Этим требованиям максимально отвечают алюминиевые деформируемые сплавы, имеющие высокий уровень механических свойств, которые и используются в космическом машиностроении наиболее активно [1; 2]. Применение совмещенных методов обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов позволяет уменьшить число технологических операций, повысить производительность и снизить себестоимость готовой продукции [3]. Так, например, в этой области известны работы по созданию новой технологии производства сварочной проволоки из сплавов АК5 и АК12, используемой для изготовления волноводов [4].

Для современного эффективного управления технологиями обработки металлов необходимо создание и использование компьютерных инструментов имитации процессов. Такой инструмент может представлять собой программу для расчета и отображения взаимосвязанных изменений технологических параметров при изменении условий процесса. Имитационные расчеты осуществляются встроенной в программу математической динамической моделью процесса. Опыт применения подобных программ при получении алюминия-сырца описан в работах [5–7].

Моделирование литейно-прокатных установок для задач управления представлено в литературе в ограниченном объёме и направлено на управление параметрами в отдельных узлах (модель натяжения между клетями, регулирование ширины проката и т. п.) [8]. Имеются модели, описывающие тепловое и напряженно-деформированное состояние узла деформации и кристаллизации [3; 9]. Эти модели разрабатывались с целью определения технологических и энергосиловых параметров деформирующего узла для получения полуфабрикатов необходимого качества из алюминия и его сплавов.

Разработка математической модели, комплексно описывающей взаимосвязанное изменение параметров узлов агрегата совмещенной обработки металла (рис. 1), позволит рассчитать, визуализировать процесс и отладить алгоритмы управления на виртуальной модели. Также упрощенные уравнения могут применяться непосредственно в алгоритмах АСУТП.

Рис. 1. Экспериментальная установка СЛИПП-2,5

Постановка задачи моделирования. В настоящей работе объектом исследования является литейно-прокатно-прессовый агрегат, с помощью которого реализуется метод совмещённого литья и прокатки-прессования (СЛИПП) для получения длинномерных изделий из алюминиевых сплавов [10]. Он включает (рис. 2) печь-миксер для приготовления сплава, раздаточный лоток, деформирующий узел, состоящий из прокатной клети и поджатой с помощью гидроцилиндра к валкам матрицы, устройство для охлаждения изделий и приемное устройства для их смотки в бухты (моталку).

В прокатную клеть поступает жидкий металл после раздаточного лотка, где он кристаллизуется в закрытом калибре валков и выдавливается при помощи активных сил трения через матрицу, при этом получают пресс-изделие заданного размера и формы (в данном случае пруток круглого сечения диаметром 9,5 мм). Полученный пруток направляется на моталку.

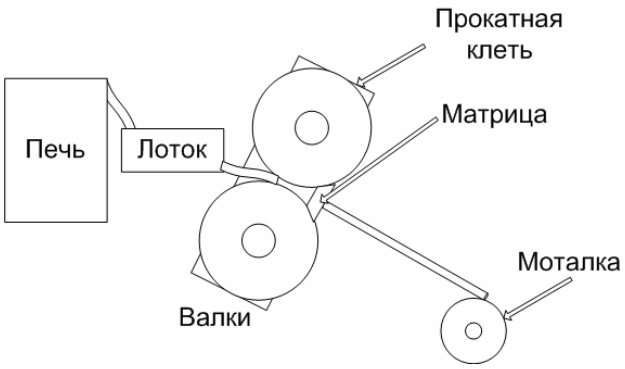


Рис. 2. Принципиальная схема агрегата СЛИПП

Имеется три значительно различающихся с точки зрения автоматического управления режима работы установки: пусковой режим; стационарный режим, с момента поступления пресс-изделия на моталку с постоянной скоростью вращения валков и постоянным зазором между валками; нестационарный режим прокатки.

Автоматическое управление в стационарном режиме должно обеспечить постоянный расход металла, одинаковый во всех узлах агрегата, заданные температуры на входе в прокатную клеть, заданный температурный режим в узле прессования, заданную температуру катанки на выходе из матрицы, обеспечить скорость вращения приемного устройства, соответствующую расходу металла.

Поэтому с помощью модели вычисляют в контрольных точках температуру и скорость прохождения металла, его объём, угол наклона печи, скорость вращения моталки. Контрольные точки привязаны к узлам агрегата: печь, лоток, деформирующий узел, узел охлаждения, приемное устройство.

Основой модели являются обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие изменение указанных выше переменных от координаты или от времени. Начальные условия на входе в каждый узел определяются технологическими константами или выходными расчетами на предыдущем узле.

Математическая модель. Целесообразно вначале рассчитать стационарный режим как наиболее простой для моделирования и в то же время создающий базу для расчетов пускового и нестационарного режимов.

Первым узлом агрегата является печь-миксер для приготовления расплава. Для упрощения не будем вести расчет температуры нагрева металла в печи, а будем считать ее на выходе расплава из печи в лоток заданной.

Чтобы обеспечить постоянный расход металла $Q_м$, печь должна обеспечить разливку металла с постоянной скоростью:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha_0 - \alpha_{конечн}}{\tau}, \qquad (1)$$

где $\frac{d\alpha}{dt}$ – скорость изменения угла наклона печи; α_0 – угол наклона печи, при котором начинается разливка металла, определяемый объемом залитого металла и диаметром тигля; $\alpha_{конечн}$ – максимальный угол наклона печи; τ – время, за которое с заданным расходом разливается весь объем металла.

Вторым узлом агрегата является раздаточный лоток. Контрольными параметрами для системы управления являются здесь уровень металла в лотке, температура метала на подходе к деформирующему узлу, скорость движения металла.

Уровень металла в лотке h определяется заданным расходом металла $Q_м$, который необходимо контролировать.

Скорость металла в лотке $U_{ср}$ найдём по формуле

$$U_{ср} = \frac{g \cdot h^2 \cdot \sin\alpha}{3 \cdot \nu}, \qquad (2)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона лотка.

Формула (2) получена из решения задачи о стекании ньютоновской жидкости по наклонной плоскости [11].

Для расчёта температуры металла в лотке рассмотрим уравнение теплопроводности для движущейся среды:

$$\rho \cdot c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_{ср} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \\ -K_{М-Е} \cdot (T - T_E) - K_{М-Л} \cdot (T - T_Л), \qquad (3)$$

где T – средняя по толщине слоя температура металла; c – удельная теплоёмкость металла; λ – коэффициент теплопроводности металла; T_E – температура окружающей среды; $T_Л$ – температура лотка; $K_{М-Е}$ – коэффициент теплообмена на границе «металл–атмосфера», $K_{М-Л}$ – коэффициент теплообмена на границе «металл–лоток»; x – ось, направленная вдоль лотка.

В стационарном случае, пренебрегая теплопроводностью по сравнению с адвективным переносом ($\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot L} << U_{ср}$, L – длина лотка), получаем уравнение

$$c \cdot \rho \cdot U_{ср} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = K_{М-Е} \cdot (T - T_E) + K_{М-Л} \cdot (T - T_Л). \qquad (4)$$

Начальное условие для уравнения (4):

$$T(x_0) = T_0, \quad (5)$$

где T_0 – температура металла на выходе из печи.

Таким образом, зная температуру расплава в печи, можно найти температуру металла на входе в деформирующий узел совмещенной обработки.

Для определения температуры металла при прохождении через прокатную клеть необходимо рассмотреть дифференциальное уравнение теплопроводности с учётом теплоты кристаллизации:

$$\rho \cdot c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T \right) = \operatorname{div}(\lambda \cdot \nabla T) + \rho \cdot \frac{\partial Q_{\text{крист}}}{\partial t}. \quad (6)$$

При этом между валками можно выделить две зоны – зону, где находится расплавленный металл и кристаллизация только начинается, и зону, где средняя температура металла достигла температуры кристаллизации и не меняется на протяжении этой зоны, так как тепловые потери в валки уравновешиваются теплом кристаллизации.

Температура валков $T_{\text{В}}(x, y, t)$ должна рассчитываться по уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T_{\text{В}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{В}}}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

При этом в упрощенной постановке можно для расчета температуры металла использовать следующее уравнение:

$$\rho \cdot c \cdot U_{\text{ср}} \frac{dT}{dx} = \rho \cdot c \cdot K_{\text{М-В}} \cdot (T_{\text{В}} - T) + \rho \cdot \Delta Q_{\text{крист}}(x), \quad (8)$$

где $\Delta Q_{\text{крист}}(x)$ – мощность, выделяемая при кристаллизации в точке x; $U_{\text{ср}}$ – средняя скорость металла между валками, обусловленная скоростью вращения валков и зазором между ними и связанная с заданным расходом $Q_{\text{м}}$:

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{м}}}{\rho \cdot S_{\text{з}}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{з}}$ – площадь сечения зазора между валками.

Температуру поверхности валков, соприкасающуюся с металлом, в связи с высокой теплопроводностью материала валков и наличием системы охлаждения для предварительных расчетов будем считать постоянной. Также пока не рассматриваем процессы, происходящие в матрице.

После выхода из матрицы пруток остывает на воздухе или охлаждается с помощью воды. Для расчета остывания прутка запишем уравнение

$$\rho \cdot c \cdot U_{\text{ср}} \frac{dT}{dx} = K_{\text{м-воз}} \cdot (T_{\text{воз}} - T) + K_{\text{м-вод}} \cdot (T_{\text{вод}} - T), \quad (10)$$

где коэффициенты $K_{\text{м-воз}}$, $K_{\text{м-вод}}$ используем на соответствующих расчетных участках, если пруток подвергается воздушному или водяному охлаждению; $T_{\text{воз}}$, $T_{\text{вод}}$ – температура воздуха и воды.

После охлаждения пруток сматывается в бухту на приемном устройстве. Угловая скорость вращения моталки рассчитывается, исходя из его геометрических размеров и времени протекания процесса:

$$\omega = \frac{V_{\text{прут}}}{R_{\text{нак}}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{прут}}$ – скорость поступления прутка в моталку; $R_{\text{нак}}$ – радиус барабана моталки, зависящий от времени процесса:

$$R_{\text{нак}} = R_0 + \frac{t}{T_1} \cdot d, \quad (12)$$

где t – время от начала намотки прутка на моталку до текущего момента; d – диаметр прутка; T_1 – время заполнения одного слоя на моталке:

$$T_1 = 3{,}14 \cdot 2R_{\text{нак}} \cdot \frac{\eta_{\text{В}}}{V_{\text{прут}}}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{В}}$ – количество витков по ширине моталки. Формулы (12) и (13) связаны итерационной зависимостью.

Реализация математической модели для управления агрегатом СЛИПП в программных продуктах WinCC 7.0 и Step 7. Для визуализации расчётов модели и разработки компьютерной программы «Виртуальный СЛИПП» были созданы проекты в программных продуктах Simatic Step 7 и Simatic WinCC 7.0. Simatic Step 7 – стандартное программное обеспечение SIMATIC для создания программ, используемых в программируемых логических контроллерах SIMATIC S7-300/400 [12]. С помощью этой программы выполняется комплекс работ по программированию контроллеров и конфигурированию (настройке) оборудования и сетей. Утилиты конфигурирования позволяют осуществлять диагностику оборудования, обнаруживать аппаратные ошибки или неправильный монтаж оборудования. Программирование контроллеров производится редактором программ, обеспечивающим написание программ на трех языках: LAD – язык релейно-контактной логики; FBD – язык функциональных блочных диаграмм; STL – язык списка инструкций.

В дополнение к трем основным языкам могут быть добавлены четыре дополнительных языка: SCL – структурированный язык управления, по синтаксису близкий к Pascal; GRAPH 7 – язык управления последовательными технологическими процессами; HiGraph 7 – язык управления на основе графа состояний системы; SFC – язык диаграмм состояния.

На рис. 3 изображена общая структура программы «Виртуальный СЛИПП».

Программа состоит из блоков данных, функций, организационного блока. Организационный блок написан на языке функциональных блочных диаграмм FBD.

FBD – это графический язык программирования, использующий для представления логических операций логические блоки, известные в булевой алгебре. Сложные функции (например, математические) тоже могут быть представлены непосредственно соединенными с логическими блоками [13].

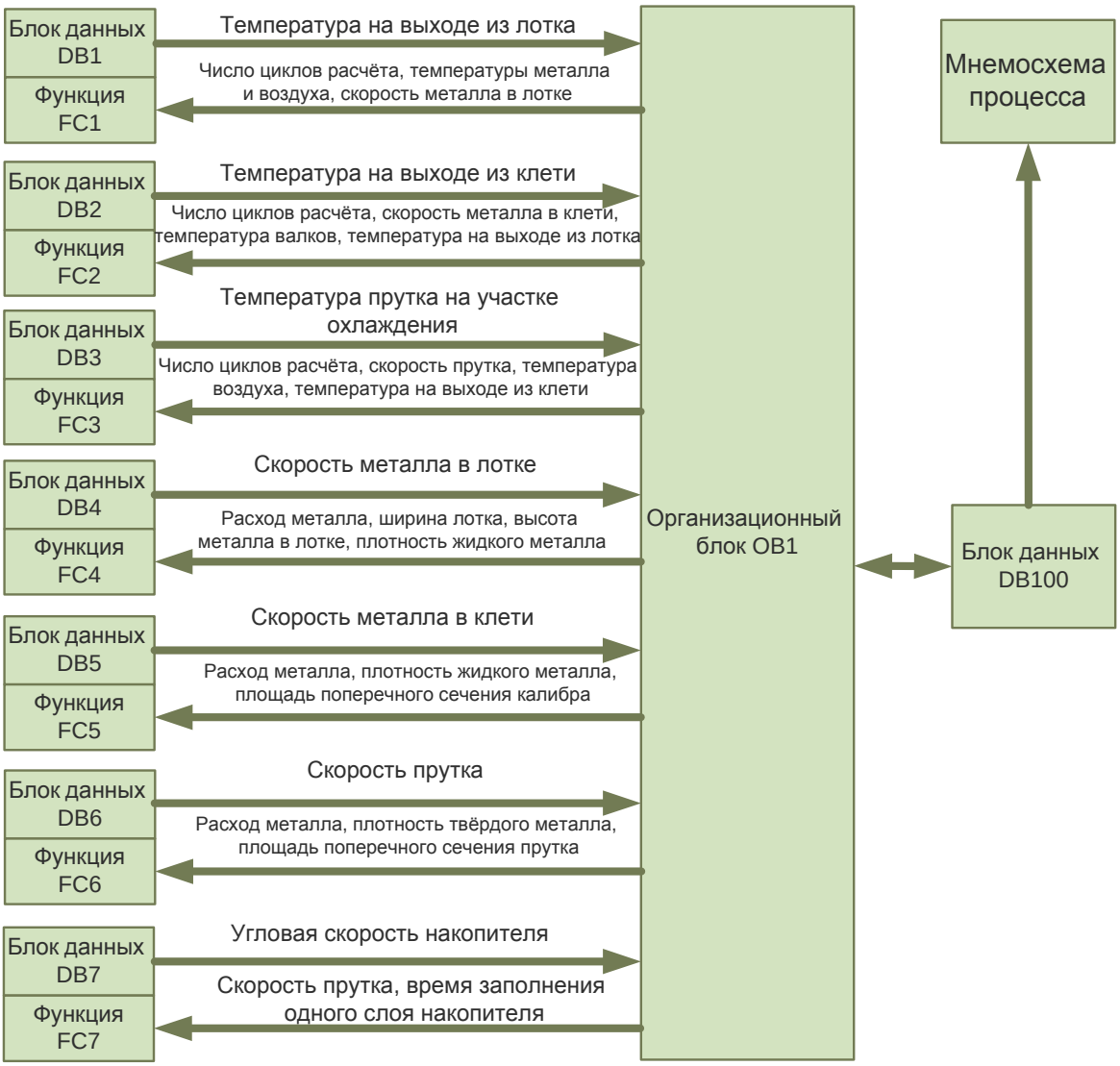


Рис. 3. Схема взаимодействия блоков программы

На рис. 4 приведён фрагмент организационного блока программы, написанный на языке FBD и реализующий передачу из блока данных DB100 в блок данных DB1 начального значения температуры, необходимого для запуска цикла расчёта температуры металла в лотке.

Исходные данные заносятся в блок данных DB100. Блоки данных DB1, DB2, …, DB7. Все необходимые данные для начала расчёта берут в блоке данных DB100. Рассчитанные параметры поступают в DB100 (рис. 5). Например, после расчёта узла «печь» в блоке DB1 полученные значения поступают в блок DB100. Эти значения из блока DB100 используются блоками, рассчитывающими параметры других узлов агрегата, рассчитанные значения которых в свою очередь также поступают в блок DB100. Блокам данных DB1, DB2, …, DB7 соответствуют функции FC1, FC2, …, FC7. Например, в DB1 хранятся начальные и расчётные данные по температуре металла в лотке, а в FC1 хранится алгоритм, по которому данные в блоке DB1 преобразуются, т. е. функция FC1 решает уравнение (4) в соответствии с разностной схемой. По окончании расчёта данные отправляются в блок DB100 для создания общей таблицы параметров.

Функции FC1, FC2, …, FC7 выполнены в SCL [14]. Структурированный язык управления SCL (Structured Control Language) является языком программирования высокого уровня для PLC SIMATIC S7. SCL содержит в себе элементы языка Паскаль наряду с типичными для PLC элементами, такими, например, как input и output. SCL особенно подходит для программирования сложных алгоритмов или для задач, относящихся к области управления данными, поддерживает характерную для Step 7 блочную структуру, а также позволяет создавать S7-программы, включающие в себя фрагменты на базовых языках программирования STL, LAD и FBD. Использование нами SCL в программе обосновано простотой реализации в нём циклов для решений дифференциальных уравнений.

Структура программы прописывается с помощью организационного блока OB1. В нём создаются все маршруты (адресация) передачи данных между блоками. То есть организационный блок – посредник между всеми остальными блоками.

Для визуализации рассчитанных по модели данных разработана мнемосхема процесса СЛИПП в программном продукте Simatic WinCC 7.0. Simatic WinCC (Windows Control Center) представляет собой мощную систему HMI, работающую под управлением ОС Microsoft Windows XP, Windows Vista и Microsoft Windows Server 2003 [15]. HMI расшифровывается как Human Machine Interface (человеко-машинный интерфейс), т. е. интерфейс для взаимодействия между человеком и машиной. Система WinCC обеспечивает управление и наблюдение за процессами, происходящими на установке. Связь между WinCC и установкой обеспечивается с помощью системы автоматизации.

Ниже перечислены некоторые из возможностей WinCC, благодаря которым выбран этот программный продукт:

– визуализация техпроцесса (Graphic Designer);

– конфигурирование и настройка связи с контроллерами различных производителей (Tag Management);

– отображение, архивирование и протоколирование сообщений от технологического процесса (Alarm Logging);

– отображение, архивирование и протоколирование переменных (Tag Logging);

– открытый OPC-интерфейс (OLE for Process Control);

– взаимодействие с пакетом Simatic Step 7.

На рис. 6 представлена мнемосхема, отображающая значения рассчитанных по модели параметров процесса в каждом из узлов агрегата в контрольных точках. WinCC получает необходимые данные, обращаясь по адресам переменных в блоке данных DB100. Угол наклона печи отображен на мнемосхеме сверху. Внизу по всей строке показаны значения температуры металла в разных точках агрегата. Для печи это температура разливки, для лотка – температура металла на входе в прокатную клеть, для прокатной клети – температура металла на выходе из валков. Далее показана температура прутка на расстоянии 1,5 м от узла прокатки, без водяного охлаждения. Нижняя строка – скорость движения металла в разных узлах агрегата. Справа отображена угловая скорость вращения барабана моталки.

На мнемосхеме представлены результаты расчётов, выполненных для стационарного режима. Следует отметить, что для достижения адекватности расчетных и практических данных необходимо идентифицировать теплофизические константы и уточнить размеры и конструкцию агрегата, при этом исходными параметрами являются расход и температура металла в печи, а также геометрические характеристики узлов агрегата СЛИПП.

Заключение. Разработана комплексная математическая модель для управления работой узлов агрегата СЛИПП, реализующего метод совмещённого литья и прокатки-прессования для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Модель реализована программно в пакетах Step 7 и WinCC 7.0. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании и внедрении оборудования и технологии совмещенной обработки для производства прутков, катанки, профилей и проволоки для нужд электротехнической промышленности и космического машиностроения.

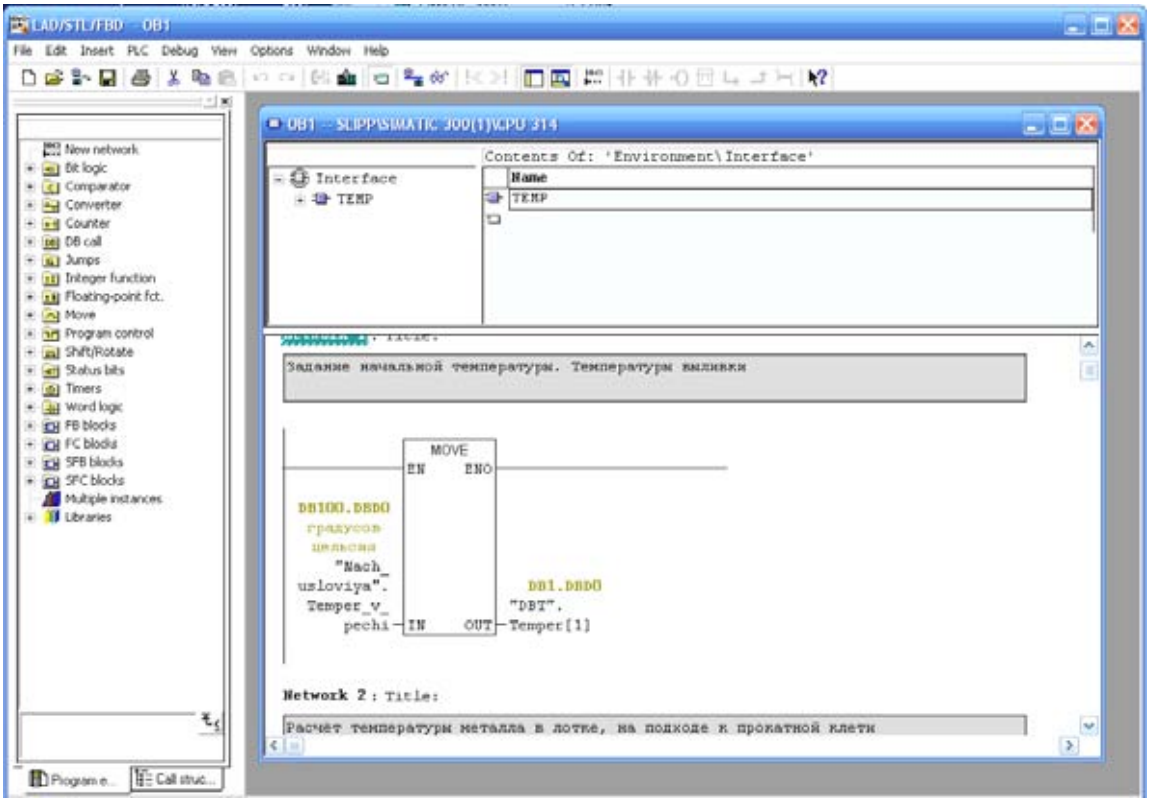
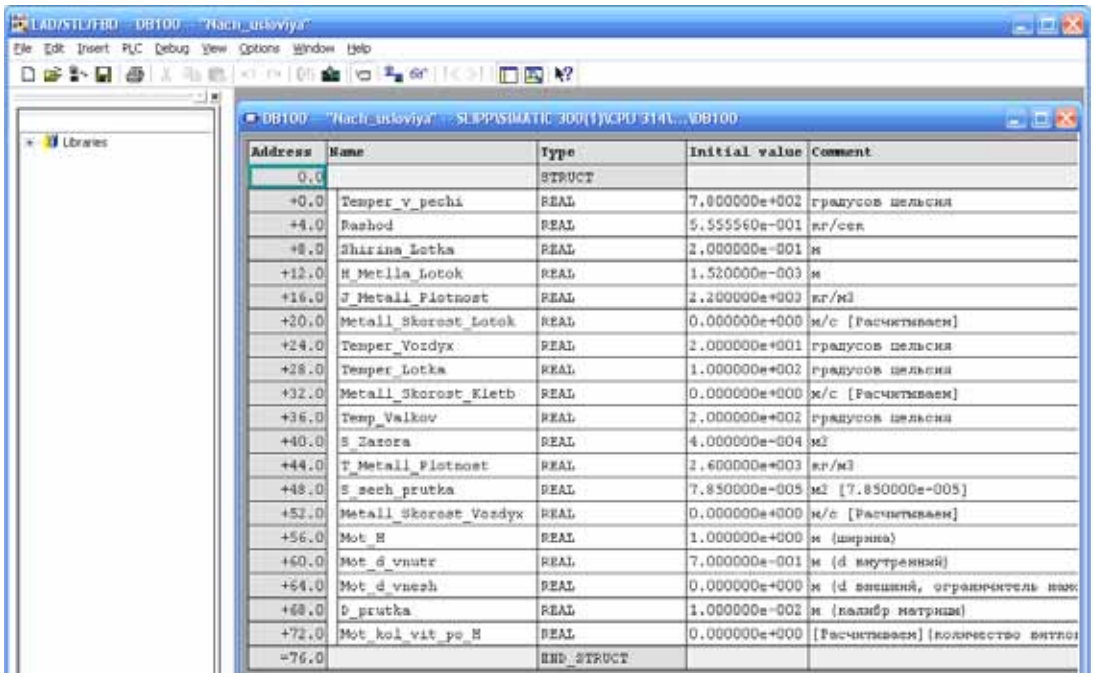


Рис. 4. Фрагмент организационного блока программы



Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	Temper_v_pechi	REAL	7.000000e+002	градусов цельсия
+4.0	Rashod	REAL	5.555560e-001	кг/сек
+8.0	Shirina_Lotka	REAL	2.000000e-001	м
+12.0	H_Metlla_Lotok	REAL	1.520000e-003	м
+16.0	J_Metall_Plotnost	REAL	2.200000e+003	кг/м3
+20.0	Metall_Skorost_Lotok	REAL	0.000000e+000	м/с [Расчитываем]
+24.0	Temper_Vozdyx	REAL	2.000000e+001	градусов цельсия
+28.0	Temper_Lotka	REAL	1.000000e+002	градусов цельсия
+32.0	Metall_Skorost_Kletb	REAL	0.000000e+000	м/с [Расчитываем]
+36.0	Temp_Valkov	REAL	2.000000e+002	градусов цельсия
+40.0	S_Zazora	REAL	4.000000e-004	м2
+44.0	T_Metall_Plotnost	REAL	2.600000e+003	кг/м3
+48.0	S_sech_prutka	REAL	7.850000e-005	м2 [7.850000e-005]
+52.0	Metall_Skorost_Vozdyx	REAL	0.000000e+000	м/с [Расчитываем]
+56.0	Mot_H	REAL	1.000000e+000	м (ширина)
+60.0	Mot_d_vnutr	REAL	7.000000e-001	м (d внутренний)
+64.0	Mot_d_vnesh	REAL	0.000000e+000	м (d внешний, ограничитель наж
+68.0	D_prutka	REAL	1.000000e-002	м (калибр матрицы)
+72.0	Mot_kol_vit_po_H	REAL	0.000000e+000	[Расчитываем](количество витко
=76.0		END_STRUCT		

Рис. 5. Блок данных DB100 программы: расчётные значения и константы

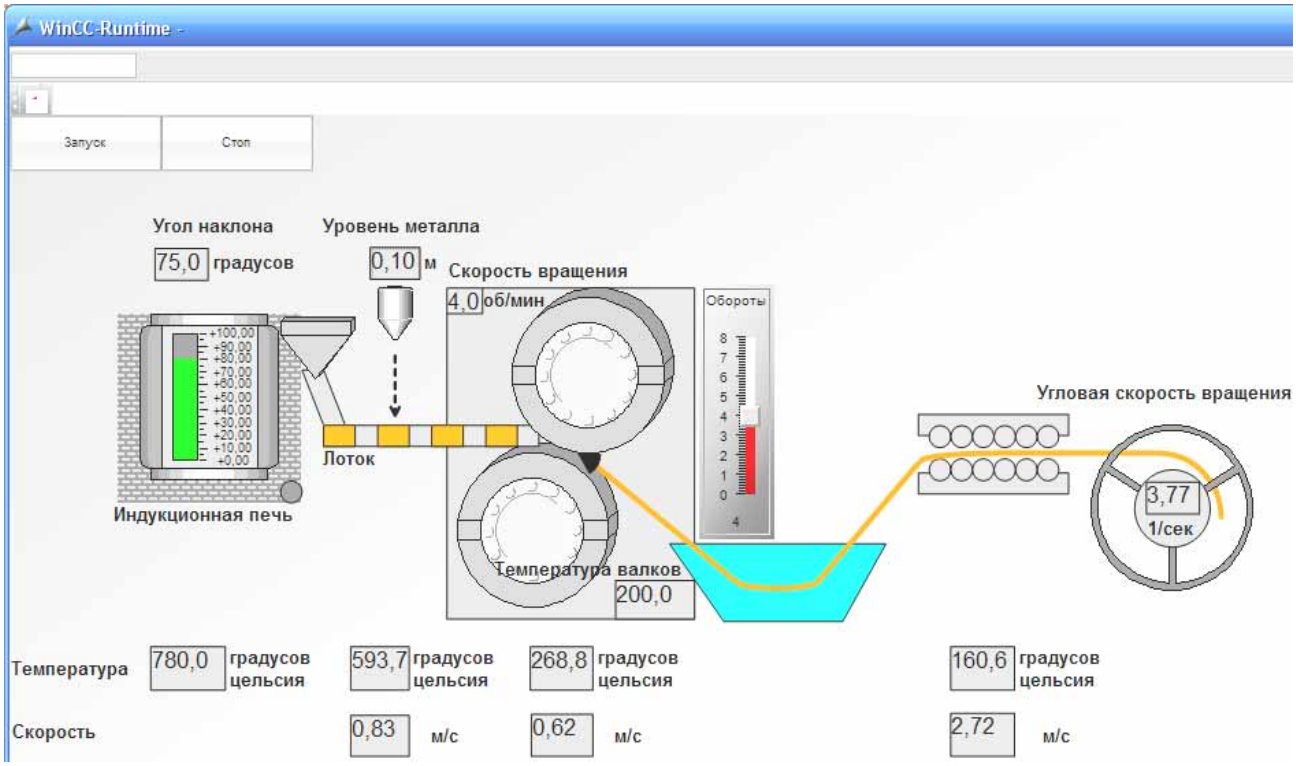


Рис. 6. Мнемосхема процесса СЛИПП

Благодарности. Благодарим сотрудника Центра инжиниринга и логистики Красноярского отделения Российского представительства Siemens Андрея Солодовникова за консультации по работе с ПО Step 7 и WinCC 7.0.

Acknowledgements. We would like to thank Solodovnikov Andrew, the employee of the Center for Engineering and Logistics of Krasnoyarsk branch of the Russian representation of Siemens, for advice on working with the software Step 7 and WinCC 7.0.

Библиографические ссылки

1. Суслина А. А. Алюминий и его сплавы : учеб. пособие / сост. А. Р. Луц. Самара : Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013. С. 4.

2. Механические свойства алюминиевых сплавов : монография / Н. А. Грищенко [и др.]. / Сибирский федеральный ун-т. Красноярск, 2012. 196 с.

3. Сидельников С. Б., Довженко Н. Н., Загиров Н. Н. Комбинированные и совмещённые методы обработки

цветных металлов и сплавов : монография. М. : МАКС Пресс, 2005. 344 с.

4. Разработка новой технологии комбинированной обработки силуминов / С. Б. Сидельников [и др.] // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 5 (12). С. 233–235.

5. Piskazhova T. V., Mann V. C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. Vol. 58, № 2. P. 48–52.

6. Пискажова Т. В. Программа-имитатор для поддержки принятия технологических решений при получении алюминия // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 41–44.

7. Multimedia for Training Cell Operators / Claude Fradet [et al.] // Light Metals. 2001. P. 387–391.

8. Восканьянц А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки : учеб. пособие / Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.

9. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми процессами : монография / Н. Н. Довженко [и др.]. / Сибирский федеральный ун-т. Красноярск. 2009. 256 с.

10. Пат. 2457914 C1 Российская Федерация, МПК B 21 C 3/00, B 22 D 11/00. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / Баранов В. Н., Ворошилов Д. С., Галиев Р. И., Довженко И. Н., Довженко Н. Н., Лопатина Е. С., Сидельников С. Б., Солдатов С. В. № 2011103241/02 ; заявл. 31.01.2011 ; опубл. 10.08.2012.

11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособие. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 736 с.

12. Simatic. Работа со STEP 7 V 5.3. Первые шаги: Руководство. Редакция 01/2004 A5E00261403-01. 114 с.

13. Step 7 [Электронный ресурс]. URL: http://www.step7-pro.ru/fb/fub1.html (дата обращения: 02.02.2015).

14. Бергер Ганс. Автоматизация посредством Step 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400. 2001. 776 с.

15. Simatic. WinCC V7.0 Начало работы: Руководство. Редакция 04/2008. 254 с.

References

1. Suslina A. A. *Alyuminii i ego splavy: Uchebnoe posobie* [Aluminium and its alloys: Textbook]. Amounted. A. R. Luts. Samara, Samara St. Technical Univ. Publ., 2013, 4 p.

2. Grishchenko N. A., Sidelnikov S. B., Gubanov I. Yu. Et al. *Mekhanicheskie svoistva alyuminievykh splavov* [The mechanical properties of aluminum alloys]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2012, 196 p.

3. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N, Zagirov N. N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: monografiya*. [Combined and combined methods of non-ferrous metals and alloys: a monograph]. Moscow, MAKS Press Publ., 2005, 344 p.

4. Sidelnikov S. B., Dovzhenko N. N., Gorbunov Yu. A. [Development of new technology combined treatment silumins]. *Vestnik SibGAU*. 2006, No. 5, P. 233–235 (In Russ.).

5. Piskazhova T. V., Mann V. C. The use of a dynamic aluminum cell model. *JOM*, 2006, Vol. 58, No. 2, P. 48–52.

6. Piskazhova T. V. [The program – a simulator to support technological solutions in the preparation of aluminum]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2010, No. 7, P. 41–44 (In Russ.).

7. Fradet C., Bouchard B., Lapointe J., Rivard G. Multimedia for Training Cell Operators. *Light Metals*. 2001, P. 387–391.

8. Voskan'yants A. A., *Avtomatizirovannoe upravlenie protsessami prokatki* [Automated management processes rolling]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2010, 85 p.

9. Dovzhenko N. N, Belyaev S. V., Sidelnikov S. B. *Pressovanie alyuminievykh splavov: modelirovanie i upravlenie teplovymi protsessami* [Pressing of aluminum alloys: modeling and control of thermal processes]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2009, 256 p.

10. Baranov V. N., Voroshilov D. S., Galiev R. I., Dovzhenko I. N., Dovzhenko N. N., Lopatina E. S., Sidelnikov S. B., Soldatov S. V. *Ustroistvo dlya nepreryvnogo lit'ya, prokatki i pressovaniya tsvetnykh metallov i splavov* [Device for continuous casting and rolling compacting ferrous metals and alloys]. Patent RF, no. 2457914 C1, 2012.

11. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika* [Theoretical physics]. In 10 volumes. Vol. 6. Hydrodynamics. 3rd edition, revised. Moscow, Nauka Publ., 1986, 736 p.

12. *Simatic. Rabota so STEP 7 V 5.3. Pervye shagi: Rukovodstvo*. [Simatic. Working with STEP 7 V 5.3. First Steps: A Guide]. 2004, A5E00261403-01, 114 p.

13. *O programme Step 7. Rukovodstvo*. [About the program Step 7. A Guide]. Available at: http://www.step7-pro.ru/fb/fub1.html (accessed 02.02.2015).

14. Berger G. *Avtomatizatsiya posredstvom Step 7 s ispol'zovaniem STL i SCL i programmiruemykh kontrollerov SIMATIC S7-300/400*. [Automation through Step 7 using STL and SCL and programmable controllers SIMATIC S7-300 / 400]. 2001, 776 p.

15. *Simatic. WinCC V7.0 Nachalo raboty: Rukovodstvo*. [Simatic. WinCC V7.0 Getting Started Guide]. 2008, 254 p.

© Пискажова Т. В., Сидельников С. Б., Белолипецкий В. М., Якивьюк П. Н., Сидельников А. С, 2015

УДК 539.21:537.86

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 478–484

ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК В КАТИОН-ЗАМЕЩЕННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho)

О. Б. Романова[1,2*], А. М. Харьков[1], М. Н. Ситников[1], В. В. Кретинин[1]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
[*]E-mail: rob@iph.krasn.ru

Представлены результаты исследования транспортных свойств катион-замещенных сульфидов $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) с ГЦК-решеткой типа NaCl в области температур 77–1200 К. С увеличением степени катионного замещения в этих соединениях $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) изменяется тип проводимости от полупроводникового до металлического при критической концентрации X_C. Концентрационный переход металл–диэлектрик в системе $Gd_XMn_{1-X}S$ сопровождается уменьшением величины удельного электросопротивления на 12 порядков и коэффициента термоЭДС (α) на два порядка. Катионное замещение в твердых растворах $Gd_XMn_{1-X}S$ приводит к смене дырочного типа проводимости (α > 0), свойственного моносульфиду марганца, на электронный (α < 0). Уменьшение величины α с увеличением содержания гадолиния в решетке MnS указывает на то, что Gd действует как донорная примесь. Для $Sm_{0,2}Mn_{0,8}S$ обнаружен резкий максимум сопротивления при T = 100 К, который может быть вызван рассеянием электронов проводимости на спиновых флуктуациях локализованных электронов. Установлен металлический тип проводимости для $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ и механизм электрического сопротивления, который связан с рассеянием электронов на акустических фононах и с магнитным рассеянием на нескомпенсированных антиферромагнитных кластерах марганца при T < 180 К. В результате замещения марганца самарием в твердом растворе $Sm_XMn_{1-X}S$ электронная структура перестраивается, и сопротивление невозможно объяснить на основе протекания ионов самария. Общей закономерностью температурных зависимостей коэффициента термоЭДС как для системы с гадолинием, так и для системы с самарием является проявление отрицательного значения термоЭДС во всем диапазоне температур с ростом X. В системе $Ho_XMn_{1-X}S$ переход металл–диэлектрик обнаружен для X_C = 0,3 с уменьшением величины удельного электросопротивления на десять порядков. Цель данной работы – установить условия реализации перехода металл–диэлектрик в катион-замещенных системах $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho).

Ключевые слова: сульфиды редкоземельных элементов, проводимость, переход металл–диэлектрик, термоЭДС.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 478–484

METAL-INSULATOR TRANSITION IN THE CATION-SUBSTITUTED COMPOUNDS $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho)

O. B. Romanova[1,2*], A. M. Kharkov[1], M. N. Sitnikov[1], V. V. Kretinin[1]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: rob@iph.krasn.ru

This paper presents the results of a study of the transport properties of cation-substituted sulfides $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = = Gd, Sm, Ho) with FCC NaCl type in the temperature range 77–1200 K. With increasing degree of cation substitution in these compounds $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) the conductivity type changes from the semiconductor to the «metal» at the critical concentration X_C. The concentration of metal-insulator transition in the system $Gd_XMn_{1-X}S$ is accompanied by a decreasing in the electrical resistivity of value on 12 orders and Seebeck coefficient (α) is on two orders. The cation-substitution in the solid solutions $Gd_XMn_{1-X}S$ leads to p-type conductivity (α > 0), as comprising to electronic (α < 0) for manganese monosulfide. Decrease of α with increasing gadolinium concentration in the MnS lattice indicates that the Gd acts as a donor impurity. For $Sm_{0,2}Mn_{0,8}S$ a maximum resistance at T = 100 K attributed to the scattering of conduction electrons by spin fluctuations of localized electrons. The metallic conductivity for $Sm_{0.25}Mn_{0.75}S$

and the mechanism of electrical resistance, which is related to the scattering of electrons by acoustic phonons and magnetic scattering by uncompensated antiferromagnetic manganese clusters at T < 180 K were revealed. As a result of the substitution of manganese to samarium in solid solution $Sm_XMn_{1-X}S$ the electron structure is reconstructed, and the resistance cannot be explained on the basis of the percolation of samarium ions. The temperature dependence of Seebeck coefficient for systems with gadolinium and with samarium reveals the negative values of thermoelectric power in the all range of temperatures with increasing concentration (X). The metal-insulator transition for system $Ho_XMn_{1-X}S$ at X_C = 0,3 is observed with decreasing resistivity on ten orders. The purpose of this work is to establish conditions for the realization of the metal-insulator transition in a cation-substituted systems $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho).

Keywords: sulfides of rare-earth elements, conductivity, transition metal-insulator, thermoelectric power.

Введение. В неупорядоченных системах при изменении состава, давления, температуры, магнитного поля возможна реализация перехода металл–диэлектрик (ПМД) типа Андерсона за счет изменения положения уровня Ферми E_F и порога подвижности E_C (E_C – энергия, отделяющая локализованные состояния от нелокализованных) и последующего их пересечения [1]. Как показывают результаты, полученные ранее, перспективными материалами для исследования ПМД в магнитоупорядоченных средах являются моносульфиды 3*d*-металлов и их твердые растворы $Me_XMn_{1-X}S$ (Me = Cr, Fe, V, Co) [2–5]. Замещение катионов марганца редкоземельными элементами в сульфидах MnS может индуцировать ряд фазовых переходов – магнитных, электрических [6], а также переход металл–диэлектрик. С точки зрения фундаментальных исследований особого внимания заслуживают соединения, содержащие редкоземельные элементы $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho), обладающие фазовыми переходами ПМД, сопровождающимися сменой типа проводимости от *p*- к *n*-типу, магнитными фазовыми превращениями, включая изменения магнитных свойств при сохранении магнитной симметрии.

Замещение марганца редкоземельным элементом в соединениях $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) приведет к сдвигу *f*-уровня. Здесь возможно несколько вариантов: *f*-уровень попадает в зону проводимости и электрон переходит с Re иона не на *d*-уровень редкоземельного иона, а в зону проводимости, оставаясь связанным с донором. Если концентрация подобных центров невелика, меньше критической концентрации для образования примесной зоны или порога протекания, то вещество останется полупроводником. В случае расположения *f*-уровня в запрещенной зоне вблизи химпотенциала, возможно появление экстремумов в температурной зависимости сопротивления при смещении химпотенциала в условиях повышения температуры. Близость *f*-уровня к химпотенциалу может привести к значительной величине термоЭДС.

Замещение марганца трехвалентным ионом вызовет электронное допирование и может индуцировать орбитальное упорядочение [7; 8], что приведет к расщеплению электронной плотности состояний. В зависимости от расположения уровня Ферми относительно расщепленной плотности состояний электросопротивление может меняться в несколько раз [9]. Величина орбитального момента зависит от кристаллического поля, создаваемого заряженными ионами. В результате изменения орбитального момента под действием внешнего магнитного или электрического поля деформируется кристаллическая решетка и меняется спектр электронных возбуждений и, соответственно, транспортные характеристики [10]. Это приводит к взаимосвязи магнитных и электрических свойств.

Цель данной работы – определить условия реализации перехода металл–диэлектрик, а именно, критическую концентрацию, при которой происходит смена носителей заряда в результате электронного допирования при катионном замещении марганца гадолинием, самарием, гольмием $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho).

Изучение взаимосвязи электронной, магнитной и структурной подсистем кристалла в окрестности перехода металл–диэлектрик, исследование изменения этой взаимосвязи в зависимости от внешнего воздействия и состояния кристалла открывают широкие перспективы в решении фундаментальных проблем физики твердого тела, разработке методов прогнозирования и создания материалов с заведомо заданными управляемыми физико-техническими параметрами.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Твердые растворы сульфидов $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) выращены в кварцевом реакторе из расплава с использованием метода, описание которого приведено в работе [11]. Исследование температурных зависимостей намагниченности, электросопротивления и термоЭДС сульфидов твердых растворов с содержанием редкоземельных элементов $0 \le X \le 0{,}3$ проведено в интервале температур 80–1200 К в магнитных полях до 10 кЭ.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа синтезированные образцы $Re_XMn_{1-X}S$ (Re = Gd, Sm, Ho) представляют собой твердые растворы с ГЦК-решеткой типа NaCI [11–13], типичной для моносульфида марганца α–MnS (*a* = 5,22 Å) [14].

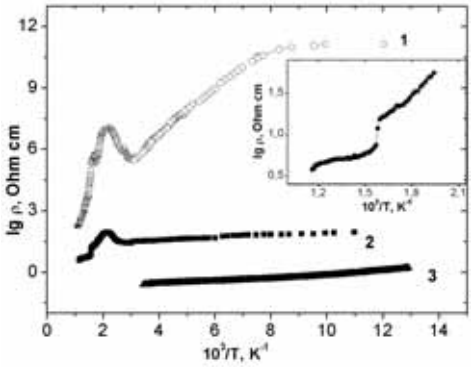


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления образцов $Gd_XMn_{1-X}S$ с X = 0,01 (1); X = 0,1 (2) и X = 0,3 (3). На вставке: температурная зависимость удельного электросопротивления для X = 0,1 в области 500–900 К

Образцы $Gd_XMn_{1-X}S$ ($0{,}01 \le X \le 0{,}3$) являются антиферромагнитными полупроводниками [1]. В магнитоупорядоченной области ниже T_N в образце с концентрацией замещения X = 0,1 наблюдается необратимое поведение намагниченности при охлаждении образца в нулевом магнитном поле ZFC и магнитном поле H = 0,5 кЭ FC, что может свидетельствовать об образовании спонтанного магнитного момента. Для состава X = 0,01 в этом же магнитном поле в магнитоупорядоченной области кривые ZFC и FC совпадают. Для образца X = 0,1 обнаружено небольшое отклонение от закона Кюри–Вейсса в области температур от T_N до 700 К. Такое поведение удельной намагниченности характерно для веществ, содержащих кластеры с ферромагнитным упорядочением. Исследование электрических свойств и термоЭДС показали, что изменение концентрации Gd в интервале X = 0,01–0,3 существенным образом оказывает влияние на проводящие и термоэлектрические свойства в интервале температур $80 \le T \le 1200$ К [15; 16]. Установлено, что при замещении катионов Mn^{2+} ионами Gd^{2+} наблюдаются фазовые переходы типа металл–диэлектрик как по концентрации (X_C = 0,3), так и по температуре (T_C = 450 К). Концентрационный переход металл–диэлектрик сопровождается уменьшением величины удельного электросопротивления на 12 порядков (рис. 1) и коэффициента термоЭДС (α) на два порядка (рис. 2). При температуре 450 К на зависимостях lg p(1/T) для X = 0,01; 0,1 наблюдаются максимумы, связанные с переходом от полуметаллической к полупроводниковой проводимости. В области температур ~ 670 К на зависимостях lg $p(1/T)$ этих составов проявляются аномалии, характерные для переходов от примесной к собственной проводимости, аналогично α–MnS. (рис. 1, вставка). Величина запрещенной зоны E_g, определенная из наклона прямолинейной части зависимости lg $p(1/T)$, уменьшается от 2,46 эВ для α–MnS (X = 0) до 0,64 эВ для $Gd_XMn_{1-X}S$ (X = 0,1). Переход от примесной к собственной проводимости в образце X = 0,01 сопровождается уменьшением коэффициента термоЭДС. Кривая зависимости $\alpha = f(T)$ в интервале температур $670 \le T \le 900$ К находится в отрицательной области значений коэффициента термоЭДС (рис. 2).

Смена знака коэффициента термоЭДС на отрицательный свидетельствует о смене типа носителей заряда от p- к n-типу в указанной области температур. Таким образом, катионное замещение в твердых растворах $Gd_XMn_{1-X}S$ ($0{,}01 \le X \le 0{,}3$) приводит к смене дырочного типа проводимости ($\alpha > 0$), свойственного моносульфиду марганца, на электронный ($\alpha < 0$).

Уменьшение величины α с увеличением содержания гадолиния в решетке MnS указывает на то, что Gd действует как донорная примесь. Увеличение количества электронов, связанное с ростом концентрации внедренных в решетку катионов гадолиния, приводит к состоянию сильнолегированного полупроводника, и проводимость в таких веществах полностью определяется электронами.

Концентрационный переход металл–диэлектрик наблюдается в антиферромагнитных катион-замещенных сульфидах, допированных редкоземельными элементами с переменной валентностью $Sm_XMn_{1-X}S$ ($0{,}01 \le X \le 0{,}25$) [17]. Энергия локализованного f-состояния по отношению к зонным состояниям определяет структуру щели в спектре электронных возбуждений и электрические свойства соединений $Sm_XMn_{1-X}S$. Рост концентрации самария вызывает сдвиг уровня Ферми и изменение в электронной плотности состояний вблизи нее. Температурная зависимость сопротивления в твердых растворах $Sm_XMn_{1-X}S$ качественно меняется с ростом концентрации. Анализируя данные рентгеноструктурного анализа, можно сказать, что катионы самария остаются близкими к трехвалентному состоянию. Температурная зависимость сопротивления в твердых растворах $Sm_XMn_{1-X}S$ качественно меняется с ростом концентрации (рис. 3, 4).

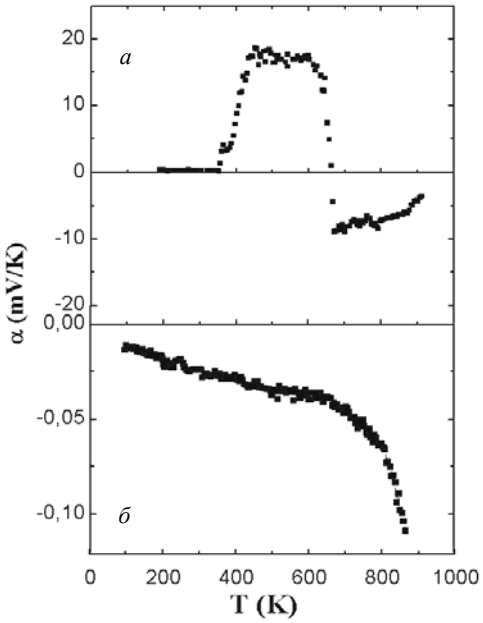


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента термоЭДС кристаллов $Gd_XMn_{1-X}S$ составов X = 0,01 (*а*); X = 0,1 (*б*)

На рис. 3 и 4 представлены температурные зависимости сопротивления твердых растворов $Sm_XMn_{1-X}S$. Для состава с X = 0,1 наблюдается небольшое изменение сопротивления в интервале 150 К < T < 220 К с точкой перегиба при T = 180 К. С ростом концентрации изменение сопротивления по температуре составляет 20 % для X = 0,15 с минимумом при T = 220 К. Выше концентрации протекания в температурной зависимости сопротивления в $Sm_XMn_{1-X}S$ для концентрации замещения X = 0,2 обнаружен резкий максимум сопротивления при T = 100 К и металлический тип проводимости для состава с X = 0,25 [18]. Аномалии в электросопротивлении можно объяснить электронным перескоком между Sm^{2+} и Sm^{3+} от занятого к пустому 5d-уровню с энергией активации E_a. Основной вклад в энергию активации E_a дает разность в энергиях d-f-взаимодействий и деформации упругой системы вблизи иона самария. Это приводит к флуктуации потенциала и диагональному беспорядку в модели Андерсона.

В собственном полупроводнике уровень Ферми находится в середине запрещенной зоны. Действительно, для переброса электрона с верхнего уровня валентной зоны на нижний уровень зоны проводимости затрачивается E_a, равная ширине запрещенной зоны ΔE. При появлении электрона в зоне проводимости в валентной зоне обязательно возникает дырка.

Следовательно, энергия, затраченная на образование пары носителей тока, должна делиться на две равные части. Так как энергия, соответствующая половине ширины запрещенной зоны, идет на переброс электрона и такая же энергия затрачивается на образование дырки, то начало отсчета для каждого из этих процессов должно находиться в середине запрещенной зоны. Энергия Ферми в собственном полупроводнике представляет собой энергию, от которой происходит возбуждение электронов и дырок $\rho = \rho_0 \cdot \exp(E_a / k_B T)$.

Минимум электрического сопротивления можно также объяснить, используя однопримесную модель Андерсона, в которой учитывается расщепление 4*f*-основного состояния мультиплета кристаллическим полем и предполагается сильное кулоновское отталкивание электронов на узле, которое ограничивает число *f*-электронов $n << 1$ в результате перераспределения одночастичного спектрального веса в окрестности уровня Ферми.

Максимум, наблюдаемый на температурной зависимости электрического сопротивления для состава X = 0,2 (рис. 3), может быть вызван рассеянием электронов проводимости на спиновых флуктуациях локализованных электронов. Так как магнитная структура неоднородна в твердых растворах $Sm_XMn_{1-X}S$, то на границе раздела Mn–Sm существует слабый ферромагнетизм, который исчезает при температурах ниже температуры Нееля. Пик сопротивления обусловлен движением границы подвижности в область локализованных состояний в результате флуктуации спиновой плотности магнитных ионов. При низких температурах химический потенциал находится в непосредственной близости от границы зоны. При этих температурах сопротивление определяется точным положением химического потенциала относительно границы зоны, при более высоких температурах, когда E_C двигается вверх, зависимость $\rho(T)$ от T определяется сдвигом E_C.

Для $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ (рис. 4) установлен металлический тип проводимости, и механизм электрического сопротивления связан с рассеянием электронов на акустических фононах и с магнитным рассеянием на нескомпенсированных антиферромагнитных кластерах марганца при $T < 180$ К. В результате замещения марганца самарием в твердом растворе $Sm_XMn_{1-X}S$ электронная структура перестраивается, и сопротивление невозможно объяснить на основе протекания ионов самария, так как поведение проводимости SmS качественно отличается по сравнению с X = 0,25.

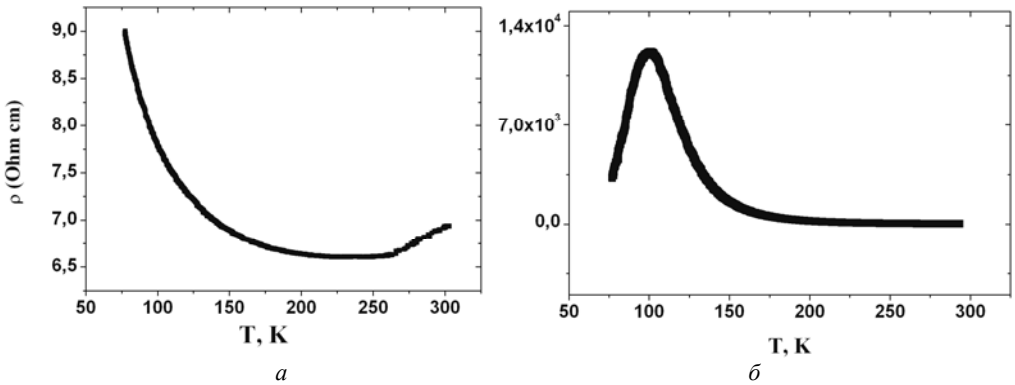


Рис. 3. Температурные зависимости удельного электросопротивления образцов системы $Sm_XMn_{1-X}S$ с X = 0,15 (*а*); X = 0,2 (*б*)

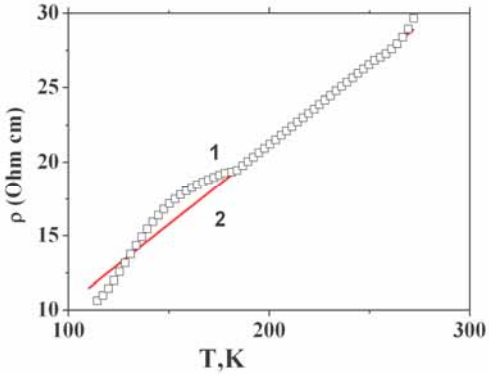


Рис. 4. Температурная зависимость удельного электросопротивления образца $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ (1) и зависимость сопротивления от температуры $\rho(T) / \rho(\Theta) = (T/\Theta)$ (2) с учетом электрон-фононного взаимодействия

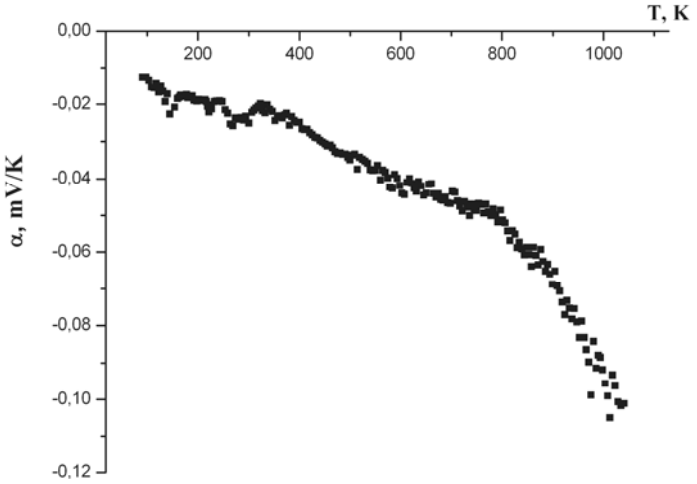


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента термоЭДС для образца $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$

На рис. 5 представлены температурные зависимости коэффициента термоЭДС α(*T*) для состава X = 0,25 в области температур 77–1000 К. Общей закономерностью зависимостей α(*T*) как для системы с гадолинием, так и для системы с самарием является появление перехода от электропроводности дырочного типа к электронному с увеличением концентрации ионов гадолиния и самария. Зависимость α(*T*) образца $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ демонстрирует только электронный тип проводимости во всем температурном диапазоне измерения. Коэффициент термоЭДС во всей области температур имеет отрицательное значение (α < 0).

Относительное изменение удельного электросопротивления в зависимости от температуры наблюдается в антиферромагнитных сульфидных соединениях $Ho_XMn_{1-X}S$. На рис. 6 изображено ρ(*T*) для трех концентраций X = 0,01; 0,2; 0,3. Температурные зависимости lg ρ($10^3/T$) для твердых растворов с X ≤ 0,1 указывают на полупроводниковый тип проводимости. Для малых концентраций замещения $Ho_{0,01}Mn_{0,99}S$ по тангенсу угла наклона линейной части lg ρ(1/*T*) определена энергия активации, которая изменяется с ростом температуры Δ*E* = 0,25 эВ до Δ*E* = 1,4 эВ. Следует отметить, что в небольшом температурном диапазоне 300 К < *T* < 600 К удельное электросопротивление не зависит от температуры. Такое поведение ρ(*T*) типично для примесных полупроводников с истощением концентрации носителей тока на примесных уровнях. С увеличением концентрации замещения энергия активации увеличивается и составляет Δ*E* = 0,3 эВ в интервале температур 150 К < *T* < 300 К для X = 0,1. Следующей особенностью является то, что при небольших концентрациях замещения ионов марганца ионами редкоземельных металлов наблюдается увеличение электросопротивления по сравнению с электросопротивлением исходного образца моносульфида марганца. При дальнейшем увеличении концентрации катионов замещения (X) наблюдается резкое уменьшение электросопротивления. Подобное явление наблюдалось и при замещении марганца в MnS ионами кобальта [19]. Для составов с X = 0,3 найдена металлическая проводимость. С ростом концентрации ионов гольмия величина удельного электросопротивления уменьшается для состава с X = 0,3 на десять порядков. При этом для этого состава резко уменьшается парамагнитная температура Кюри в результате конкуренции обменных взаимодействий в твердом растворе $Ho_XMn_{1-X}S$ (от –450 К для X = 0 до –50 К для X = 0,3). Эффективный магнитный момент уменьшается в интервале 0 < X ≤ 0,1. Выше концентрации X = 0,1 наблюдается его заметный рост [13]. Микроскопический механизм уменьшения обмена и магнитного момента связан с изменением электронной структуры ионов марганца, взаимодействующих с ионами гольмия.

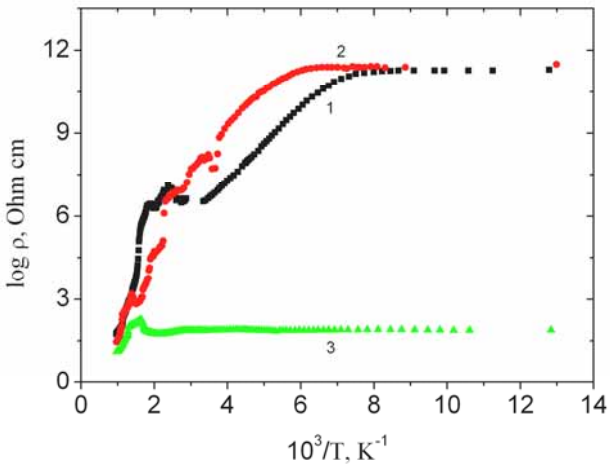


Рис. 6. Температурные зависимости удельного электросопротивления образцов системы $Ho_XMn_{1-X}S$ с X = 0,01 (1); X = 0,2 (2); X = 0,3 (3)

Ферромагнитное обменное взаимодействие между ионами марганца и гольмия приводит к росту магнитной восприимчивости с понижением температуры [13]. Для больших концентраций гольмия с X = 0,3 твердые растворы системы $Ho_XMn_{1-X}S$ уже можно отнести к вырожденным полупроводникам, у которых

удельное электросопротивление не зависит от температуры и величина сопротивления имеет промежуточное значение между полупроводником и металлом.

Заключение. Таким образом, представленные результаты доказывают, что катионное замещение в твердых растворах $Re_XMn_{1-X}S$ редкоземельными элементами гадолиния, самария и гольмия приводит к реализации электронного перехода металл–диэлектрик как по концентрации, так и по температуре.

При этом в системе $Gd_XMn_{1-X}S$ ($0{,}01 \le X \le 0{,}3$) происходит смена проводимости дырочного типа, где коэффициент Зеебека имеет положительные значения ($\alpha > 0$), свойственного моносульфиду марганца, на электронный ($\alpha < 0$). Уменьшение величины α с увеличением содержания гадолиния в решетке MnS указывает на то, что Gd действует как донорная примесь, а увеличение количества электронов, связанное с ростом концентрации внедренных в решетку катионов гадолиния, приводит к состоянию сильнолегированного полупроводника, и проводимость в таких веществах полностью определяется электронами.

Твердый раствор $Sm_XMn_{1-X}S$, содержащий ионы самария с переменной валентностью, выше концентрации протекания в температурной зависимости сопротивления для X = 0,2 обнаруживает резкий максимум сопротивления при T = 100 К и металлический тип проводимости для состава с X_C = 0,25. Аномалии, наблюдаемые на температурной зависимости удельного электросопротивления, можно объяснить электронным перескоком между Sm^{2+} и Sm^{3+} от занятого к пустому 5*d*-уровню с энергией активации E_a. Основной вклад в энергию активации E_a дает разность в энергиях *d*-*f*-взаимодействий и деформации упругой системы вблизи иона самария. Это приводит к флуктуации потенциала и диагональному беспорядку в модели Андерсона. Концентрационный переход металл–диэлектрик, наблюдающийся для X_C = 0,25, сопровождается изменением типа проводимости от дырочного типа проводимости ($\alpha > 0$) на электронный ($\alpha < 0$).

Для системы $Ho_XMn_{1-X}S$ критической концентрацией, при которой реализуется переход металл–диэлектрик, является X_C = 0,3. Твердые растворы $Ho_{0,3}Mn_{0,7}S$ можно отнести к вырожденным полупроводникам. Наблюдается корреляция электрических и магнитных свойств.

Изучая такие соединения с сильной взаимосвязью между магнитными и электрическими свойствами при изменении состава и внешних воздействий (электрические и магнитные поля, температура и давление), можно проследить закономерность изменения типа проводимости и магнитного порядка, прогнозировать и создавать новые материалы с заданными физико-техническими параметрами для разработки полупроводниковых устройств спиновой электроники.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 15-42-04099 р_сибирь_а и государственного задания № 114090470016.

Acknowledgements. This work was supported by RFBR № 15-42-04099 r_sibir_a and State task № 114090470016.

Библиографические ссылки

1. Мотт Н., Девис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., 1982. Т. 1. 368 с.
2. The interrelation of magnetic and dielectric properties of $Co_XMn_{1-X}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // J. Phys.: Condens. Matt. 2010. Vol. 22. P. 226006–226015.
3. The magnetoelastic effect in $Co_XMn_{1-X}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // Solid State Comm. 2010. Vol. 150. P. 564–567.
4. Рябинкина Л. И., Романова О. Б., Аплеснин С. С. Сульфидные соединения $Me_XMn_{1-X}S$ (Me = Cr, Fe, V, Co): технология, транспортные свойства и магнитное упорядочение // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. С. 1115–1117.
5. Спин-стекольные эффекты в твердых растворах $Co_XMn_{1-X}S$ / С. С. Аплеснин [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73. С. 1021–1023.
6. Исследование транспортных свойств катион-замещенных твердых растворов $Yb_XMn_{1-X}S$ / С. С. Аплеснин [и др.] // ФТТ. 2015. Т. 57. С. 872–876.
7. 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.
8. Аплеснин С. С., Пискунова Н. И. Спиновые и зарядовые корреляции электронов в димере с вырожденными орбиталями и заполнением электронов n = 1,5 // Вестник СибГАУ. 2012. № 2(42). С. 8–10.
9. Диэлектрические и электрические свойства полиморфного пиростаната висмута $Bi_2Sn_2O_7$ / Л. В. Удод [и др.] // ФТТ. 2014. Т. 56. С. 1267–1271.
10. Взаимосвязь магнитных и электрических свойств халькогенидов $MnSe_{1-X}Te_X$ / С. С. Аплеснин [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т. 74. С. 741–743.
11. Магнитные и электрические свойства катион-замещенных сульфидов $Me_XMn_{1-X}S$ (Me = Co, Gd) / С. С. Аплеснин [и др.] // ФТТ. 2009. Т. 51. С. 661–664.
12. Nonuniform Magnetic States and Electrical Properties of Solid Solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // IEEE Transactions on magnetics. 2011. Vol. 47. P. 4413–4416.
13. Spin reduction in the $Ho_XMn_{1-X}S$ solid solution / S. S. Aplesnin [et al.] // JMMM. 2013. Vol. 347. P. 10–13.
14. Metal insulator transition and magnetic properties indisordered systems of solid solutions $Me_XMn_{1-X}S$ / G. A. Petrakovskii [et al.] // JMMM. 1995. Т. 140. С. 147–148.
15. Magnetic properties and the metal-insulator transition in $Gd_XMn_{1-X}S$ solid solutions / O. B. Romanova [et al.] // Solid State Comm. 2010. Vol. 150. P. 602–604.
16. Аплеснин С. С., Ситников М. Н. Магнитотранспортные эффекты в парамагнитном состоянии в $Gd_XMn_{1-X}S$ // ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 104–110.
17. Metal-semiconductor transition in $Sm_XMn_{1-X}S$ solid solutions / S. S. Aplesnin [et al.] // Phys. Status Solidi B. 2012. Vol. 249. P. 812–817.
18. Electrical resistance of $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ spin glass / S. S. Aplesnin [et al.] // Solid State Phenomena, 2012. Vol. 190. P. 105–108.

19. Транспортные свойства и ферромагнетизм сульфидов $Co_XMn_{1-X}S$ / С. С. Аплеснин [и др.] // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. С. 875–883.

References

1. Mott N., Devis E. *Elektronnye protsessy v nekristallicheskikh veshchestvakh* [Electronic processes in non-crystalline materials]. 1982, Vol. 1, 368 p.

2. 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 $Co_XMn_{1-X}S$ solid solutions. *J.Phys.: Condens. Matter*, 2010, Vol. 22, P. 226006–226015.

3. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Kharkov A. M., Gorev M. V., Balaev A. D., Eremin E. V., Bovina A. F. The magnetoelastic effect in $Co_XMn_{1-X}S$ solid solutions. *Solid State Comm*., 2010, Vol. 150, P. 564–567.

4. Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Aplesnin S. S. [Sulfide compounds $Me_XMn_{1-X}S$ (Me = Cr, Fe, V, Co): the technology, the transport properties and magnetic ordering]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2008, Vol. 72, P. 1115–1117 (In Russ.).

5. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Bandurina O. N., Gorev M. V., Balaev A. D., Eremin E. V. [Spin-glass effects in solid solutions $Co_XMn_{1-X}S$]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*., 2009, Vol. 73, P. 1021–1023 (In Russ.).

6. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Kharkov A. M., Galyas A. I. [Study the transport properties of cation-substituted solid solutions $Yb_XMn_{1-X}S$]. *FTT*, 2015, Vol. 57, P. 872–876 (In Russ.).

7. Aplesnin S. S., Moskvin A. I. [The influence of strong electron correlations and interactions of electrons with the lattice on the electron orbital ordering]. *ZhETF*, 2010, Vol. 92, No. 4, P. 254–259 (In Russ.).

8. Aplesnin S. S., Piskunova N. I. [Spin and charge of electron correlation in the dimer with degenerate orbitals and electrons filling n = 1,5]. *Vestnik SibGAU*, 2012, No. 2(42), P. 8–10 (In Russ.).

9. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Molokeev M. S. [Dielectric and electrical properties of polymorphic pirostanata bismuth $Bi_2Sn_2O_7$]. *FTT*, 2014, Vol. 56, P. 1267–1271 (In Russ.).

10. Aplesnin S. S., Bandurina O. N., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Eremin E. V., Gorev M. V., Vorotynov A. M., Balaev D. A., Vasilev A. D., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetskiy G. I. [The relationship of the magnetic and electrical properties of chalcogenides $MouSe_{1-X}Te_X$]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*., 2010, Vol. 74, P. 741–743 (In Russ.).

11. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetskiy G. I., Yanushkevich K.I. [Magnetic and electric properties of the cation-substituted sulfides $Me_XMn_{1-X}S$ (Me = Co, Gd)]. *FTT*, 2009, Vol. 51, P. 661–664 (In Russ.).

12. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Eremin E. V., Romanova O. B., Balaev D. A., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu. Nonuniform Magnetic States and Electrical Properties of Solid Solutions. *IEEE Transactions on magnetics*, 2011, Vol. 47, P. 4413–4416.

13. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Sitnikov M. N., Sokolov V. V. Spin reduction in the $Ho_XMn_{1-X}S$ solid solution. *JMMM*, 2013, Vol. 347, P. 10–13.

14. Petrakovskii G. A., Loseva G. V., Ryabinkina L. I., Aplesnin S. S. Metal insulator transition and magnetic properties indisordered systems of solid solutions $Me_XMn_{1-X}S$. *JMMM*, 1995, Vol. 140, P. 147–148.

15. Romanova O. B., Ryabinkina L. I., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu., Velikanov D. A., Balaev D. A., Galyas A. I., Demidenko O. F., Makovetskii G. I., Yanushkevich K. I. Magnetic properties and the metal-insulator transition in $Gd_XMn_{1-X}S$ solid solutions. *Solid State Comm*., 2010, Vol. 150, P. 602–604.

16. Aplesnin S. S., Sitnikov M. N. [Magnetotransport effects in the ferromagnetic state in $Gd_XMn_{1-X}S$]. *ZhETF*, 2014, Vol. 100, P. 104–110 (In Russ).

17. Aplesnin S. S., Romanova O. B., Kharkov A. M., Balaev D. A., Gorev M. V., Vorotinov A. M., Sokolov V. V., Pichugin A. Yu. Metal-semiconductor transition in $Sm_XMn_{1-X}S$ solid solutions. *Phys. Status Solidi B*., 2012, Vol. 249, P. 812–817.

18. Aplesnin S. S., Kharkov A. M., Eremin E. V., Sokolov V. V. Electrical resistance of $Sm_{0,25}Mn_{0,75}S$ spin glass. *Solid State Phenomena*., 2012, Vol. 190, P. 105–108.

19. Aplesnin S. S., Ryabinkina L. I., Romanova O. B., Velikanov D. A., Balaev A. D., Balaev D. A., Yanushkevich K. I., Galyas A. I., Demidenko O. F., Bandurina O. N. [Transport properties of ferromagnetism and sulfides $Co_XMn_{1-X}S$]. *ZhETF*, 2008, Vol. 133, P. 875–883 (In Russ.).

© Романова О. Б., Харьков А. М.,
Ситников М. Н., Кретинин В. В., 2015

UDC 539.21 (06)

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 485–490

TECHNOLOGY READY USE FOR PRODUCING NANOMATERIALS IN THE PLASMA OF A LOW-PRESSURE PULSED ARC DISCHARGE

A. V. Ushakov[1], I. V. Karpov[1], A. A. Lepeshev[1,2], A. A. Shaihadinov[1], L. Yu. Fedorov[1*]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

A new method for the production of nanomaterials in the plasma of a low-pressure arc discharge is developed and experimentally studied. This method can be used to synthesize nanoparticles 5-10 nm in size with a narrow size distribution. In this method, a low-pressure arc discharge is used to melt a material, to disperse the molten material, to deliver liquid material droplets to the plasma, to cool the liquid nanoparticles forming in the plasma up to their solidification, and to deposit the solidified nanoparticles onto a substrate.

Keywords: nanomaterials, low-pressure arc discharge, vacuum, zirconium oxide, derivatogram.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 485–490

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕ ИМПУЛЬСНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

А. В. Ушаков[1], И. В. Карпов[1], А. А. Лепешев[1,2], А. А. Шайхадинов[1], Л. Ю. Федоров[1*]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Разработан и экспериментально исследован новый метод получения нанодисперсных материалов в плазме дугового разряда низкого давления. Разработанный способ позволяет синтезировать нанодисперсные частицы от 5 до 10 nm с узким распределением по размерам. Особенностью разработанного метода является то, что расплавление и диспергирование расплавленного материала, подачу полученных жидких капель этого материала в плазму, охлаждение жидких наночастиц, формируемых в плазме до их отвердевания, и осаждение полученных твердых наночастиц на подложку осуществляют при помощи дугового разряда низкого давления.

Ключевые слова: наночастицы, дуговой разряд низкого давления, вакуум, оксид циркония, дериватография.

Introduction. The following evaporation and condensation methods are used to synthesize nanodispersed powders: laser, electron beam, electric explosion of wires, and so on [1]. We believe that the synthesis of nanomaterials in the plasma of a low-pressure pulsed arc discharge is the most promising method. In this method, an initial substance is mainly generated in a vapor phase and is then transformed into a plasma state due to the erosion of the electrodes of high-current arc discharges [2]. These discharges can have almost any electric power, which opens up fresh opportunities for generating high-density monoplasma (plasma of a solid elementary substance). When such processes are carried out in high vacuum, great possibilities are opened for both direct condensation from monoplasma (in a flow or at a surface) at a high rate and direct synthesis of complex substances from elements (monoplasmas). In this case, chemical reactions are very intense since the degree of plasma ionization is very high (up to 100 %). These methods can be used to synthesize various alloys, oxides, nitrides, and carbides [3–6]. The process purity is determined by the achieved vacuum (no auxiliary atmosphere is required), and the condensation rate can be very high, increasing in proportion to the electric power of the discharge. Moreover, a vacuum arc is one of the most efficient sources of the ions of the metal to be evaporated, which makes it possible to further increase the ionization of a plasma flux due to the ionization of a

vapor component. When the plasma flux energy is sufficient, the evaporation of a metal (cathode) in a low-pressure arc discharge has the following two stages: the cathode material is first sprayed in the liquid phase in a cathode spot and is then fully evaporated in a vapor – plasma flux. In addition, the vapors are overheated because of the mixing of metal vapors with the flux of an ionizing carrier gas, which hinders premature vapor condensation and causes the dissociation of formed clusters.

The purpose of this work is to develop and study a method for producing high-quality nanoparticles smaller than 10 nm in size with a dispersion of 1.2 and to deposit a close-packed multilayer coating made of such particles onto a substrate.

Experimental. The proposed method includes the melting and dispersion of a melted cathode material using a low-pressure pulsed arc discharge, the supply of liquid drops of this material to a plasma, the cooling of the liquid nanoparticles formed in the plasma, and the solidification and deposition of solid particles onto a substrate. In this case, the arc discharge pulse duration should be shorter than the time of formation of a continuous liquid bath on a target and, on the other hand, should ensure the introduction of the energy sufficient for material (including refractory material) evaporation and the creation of a vapor density that is sufficiently low to exclude particle coalescence.

In pulsed arc discharges, the ion energy is usually lower than 10 eV and the pulse current does not exceed 3 A. These ion beam parameters are reached if the pulse duration is 20–300 μs. In this case, the cathode current density should be at least 10^8 A/cm^2 for the major portion of the material to be evaporated in the ablation regime [7]. It is impossible to fully exclude the creation of a liquid bath on a target and, hence, the emission of drops from the target due to the physics of absorption of the electron beam energy by the target material, which has a nonlinear character.

Evaporation into a low-pressure gas makes it possible to reach high expansion rates, which ensure a rapid decrease in the vapor coordination number and the formation of small particles. The presence of a gas provides sufficiently rapid cooling–quenching of powder particles due to both radiation heat exchange (as in vacuum) and molecular heat exchange. The lower value of gas pressure can be estimated from the criterion of a substantial fraction of heat losses in particles due to molecular heat exchange. This pressure was estimated to be at least 50 Pa [8–11]. The upper gas pressure can be estimated from the criterion of a stable arc discharge and the possibility of its magnetic stabilization on the cathode surface. This pressure was estimated to be higher than 80 Pa [8].

The cathode vacuum arc plasma mainly consists of ionized and excited cathode material particles. The characteristic property of the cathode vacuum arc is the discharge current density in cathode spots, where the current density, the power density, the plasma density, and the plasma pressure can reach 100 A/cm^2, 10^9 W/cm^2, 10^{20} cm^{-3}, and 10^{10} Pa, respectively, due to small arc spots (~10 μm) and a short spot lifetime (~10^{-7} s).

The formation of cathode spots results from explosive electron emission from (geometric and structural) cathode surface microasperities. It is characteristic that cathode spots move arbitrarily or under the action of an external magnetic field and form craters several or several tens of microns in diameter. These craters to a great extent result from the splashing of the material melted under the action of plasma pressure and serve as the sources of liquid drops 0.1–1 in size [12; 13].

The dense erosion plasma of a cathode spot in which drops fly has a rather high temperature because of an extremely high power density in the cathode spot; therefore, this plasma is completely ionized and contains both singly and multiply ionized ions [14].

A high energy concentration leads to explosive fracture of the cathode, which is accompanied by explosive electron emission. The splashing of a liquid metal in the form of drops and streams from a cathode spot occurs under the action of the reactive force that appears during the expansion of high-speed plasma jets, which is characteristic of short high-current arcs. Moreover, the rejection of a liquid metal to the periphery of the melt, where it is removed in a drop phase, can be explained by the thermocapillary effect caused by the temperature dependence of the surface tension of the melt.

The situation where a drop passes into a plasma jet, is overheated, and transforms into vapor can appear because of the large difference between the expansion velocities of plasma jets and drops.

Thus, our estimate shows that, at a sufficient plasma jet energy, the evaporation of a cathode in a low-pressure arc discharge has the following two-stage character: the cathode material first splashes as a liquid phase in a cathode spot and then fully evaporates in a near-electrode vapor-gas mixture. Moreover, the vapors are overheated due to the mixing of the metal vapors with the flux of an ionized carrier gas, which prevents premature vapor condensation and induces the dissociation of formed clusters.

The method was used to synthesize nanodispersed ZrO_2 on a special-purpose electric arc dispersion setup, where nanoparticles are formed using a vacuum arc discharge as a source of plasma and drops (fig. 1).

A pulsed arc evaporator of a metal is located in a vacuum chamber. This evaporator consists of a cylindrical cooled consumable electrode with attached current leads for power supply and cooling liquid supply, a coaxial cooled anode attached to the cathode with a fluoroplastic insulator, a magnetic bias system inside the anode, a flange attached to the chamber wall and to the anode with fluoroplastic insulators, and an anode combined with a cylindrical cooled condensation surface that can rotate about the cathode, and an igniter electrode with attached current leads. A pilot arc is powered with electric power supply the minus of which is connected through the magnetic bias system to current leads and the plus of which is connected to the coaxial anode. A pulsed high-current arc is powered with electric power supply the common wire of which is connected to the anode, and negative pulses are supplied through the magnetic bias system to current leads. A mechanism for the removal of

the forming powder is placed near the condensation surface. A bunker is situated in the lower part of the vacuum chamber to collect the powder. The lower part of the vacuum chamber also has a reaction gas feeding system.

Results and discussion. The developed method was implemented as follows. As the cathode for spraying, we used commercial-purity E 100 zirconium. For plasma-chemical reactions to occur, a 5 % O_2 + 95 % Ar gas mixture was let in the chamber preliminarily pumped out to a pressure of 1.33×10^{-3} atm. Synthesis was performed at a gas mixture pressure of 60 Pa. A pulsed arc discharge with a frequency of 1 kHz, a pulse duration of 250 μs, and a pulsed current amplitude of 2.3 kA was maintained with power supply.

The magnetic bias system is included into the current circuit of the cathode and is used to stabilize the operation of the arc evaporator. Melting of the material and its dispersion into drops occur in the crater of a cathode spot. Formed drops pass to the dense erosion plasma of a cathode spot. As a result, all drops are charged and heated due to collisions with electrons at least to the critical value of the beginning of their cascade division in the time of flight in the cathode spot plasma. The formed nanoparticles are cooled to solidification in the rapidly expanding cathode spot plasma and the interelectrode discharge plasma in a time of about 10^{-7} s, which results in amorphization of their structure. During the evaporation of the cathode material in the arc discharge, the nanoparticle flux reaches the rotating cooled surface and deposits on it in the form of a powder. A zirconium oxide nanopowder formed in 10 min and was then accumulated in the bunker.

The morphological composition of the powder was studied on a JEOL JEM-2100 transmission electron microscope. A ZrO_2 sample for an electron-microscopic investigation was prepared as follows: the powder was located in isopropyl alcohol and dispersed in an ultrasonic bath for 2 min, and a solution drop was then placed on a carbon film substrate situated on an electron-microscopic supporting grid. The carbon film substrate thickness was 10–15 nm.

The synthesized zirconium oxide nanopowder was light gray. Fig. 2 shows a typical photograph of the zirconium oxide nanopowder. The average particle size is 5 nm and particles 6–7 nm in size can also exist. As a rule, the particle shape is close to a spherical one. The nanoparticles have a crystalline structure, which is indicated by atomic planes observed in images. The investigation of the granulometric composition showed that the prepared nanopowder has a lognormal distribution, the average geometric particle size was d_g = 5.7 nm, the average mass particle size was d_m = 5.9 nm, and the dispersion was a_g = 1.2. The maximum specific surface for the zirconium oxide nanopowder was 470 m^2/g. The chemical composition of the ZrO_2 powder is given in the table.

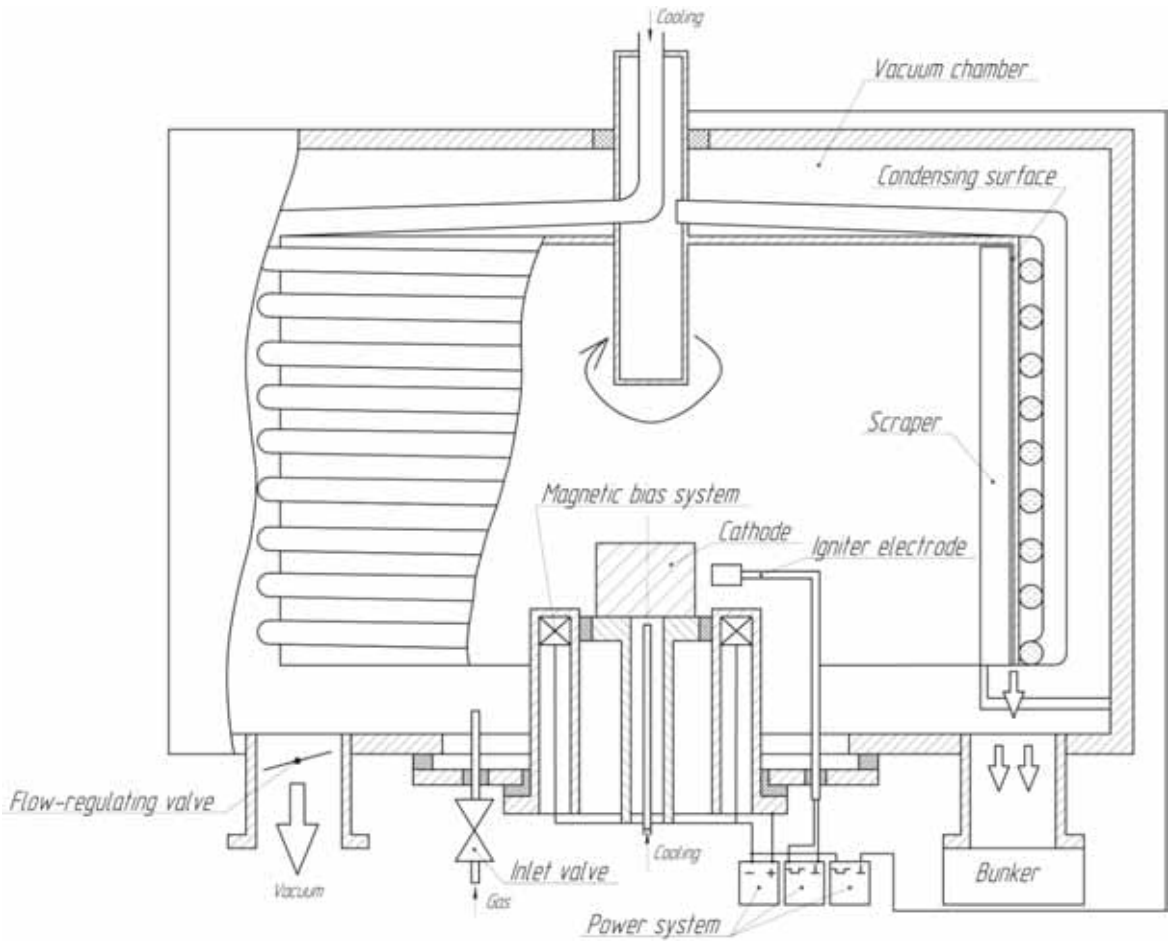


Fig. 1. Electric arc dispersion setup

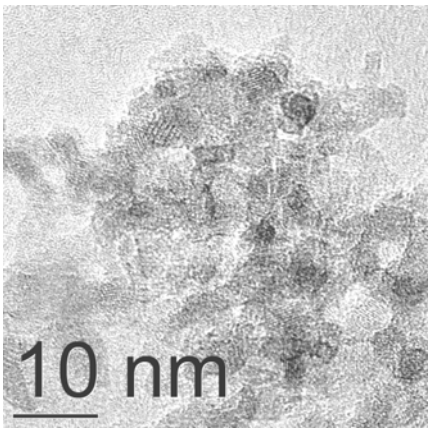


Fig. 2. Micrograph of the zirconium oxide nanopowder

The phase composition of the powder was analyzed by X-ray diffraction (XRD) with an Advance D8 diffractometer using monochromatized CuK_a radiation. Scanning was carried out at room temperature in the 20 angular range 5°–120° at a step of 0.04°.

The microstructure characteristics and the unit cell parameters were determined using the Rietveld full-profile analysis of X-ray diffraction patterns [15]. We used a software package based on a modified and corrected version of the DBWS-9006PC structure refinement program using the Rietveld method [16].

Chemical composition of a zirconium dioxide nanopowder

ZrO_2	
Element	Content, wt %
Zr	70.16
O	29.7
Si	0.02
Cr	0.02
Fe	0.04
Cu	0.04
Zn	0.02

The XRD results for the zirconium oxide powder are shown in fig. 3. When annealed at 690 K for 2 h, the zirconium oxide powder crystallizes into the tetragonal lattice corresponding to the baddeleyite structure (fig. 4). The average crystallite size is 5 nm. In contact with atmosphere, the zirconium oxide powder weight increases in 2–3 min. The maximum change in the zirconium oxide powder weight was 18 wt %.

The zirconium oxide powders formed in the plasma of a low-pressure pulsed arc discharge have a rather low bulk density, which relatively weakly depends on the specific surface area in the dispersion range under study (up to 470 m^2/g) and strongly depends on the methods of subsequent treatment of the powders. As a rule, the as-prepared powders have the minimum bulk density, which is 0.04 g/cm^3 for zirconium oxide.

The synthesized nanopowders were subjected to thermal analysis. The sample mass was 100 mg. Zirconium oxide nanopowder samples were heated in the temperature range from 291 to 1273 K at a rate of 10 K/min. The experimental results are presented in fig. 5 and 6. Water evaporates intensely from zirconium oxide nanopowders in the temperature range 343–423 K, which is indicated by a decrease in the sample mass by 4 wt % in a thermogravimetric curve in spite of the fact that the corresponding differential thermal analysis curve has no pronounced maximum.

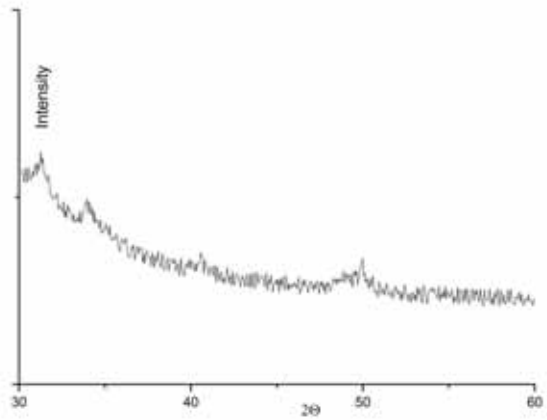


Fig. 3. X-ray diffraction pattern
of the zirconium oxide nanopowder

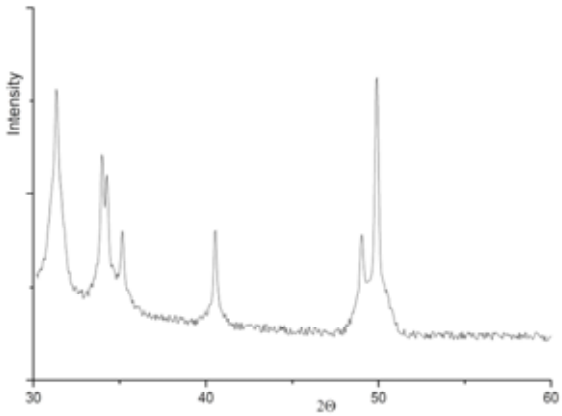


Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the ZrO_2
sample annealed at 690 K for 2 h

The experimental results demonstrate that the zirconium oxide powder produced in a low-pressure arc discharge has a particle size smaller than 10 nm with a very narrow particle size distribution. The specific surface area suggests that a condensate with a particle size that is

significantly smaller than in the base powder deposits on the particle surfaces. This condensate forms a porous "coat" around particles and substantially determines the chemical activity of the powder, which explains the high sorption activity of the powder with respect to atmospheric moisture. The optimum powder synthesis conditions are determined by the gas mixture pressure. XRD studies demonstrate that particles with both an amorphous and a crystalline structure can be synthesized when the cooling rate of the vapor-plasma flux is controlled. The phase composition of nanopowders can be controlled from nonmetal nonstoichiometry to metal nonstoichiometry. The results of investigating the oxidation of an electric arc zirconium powder in air showed that a decrease in the particle size leads to a decrease in the reactivity of the powder at room temperature.

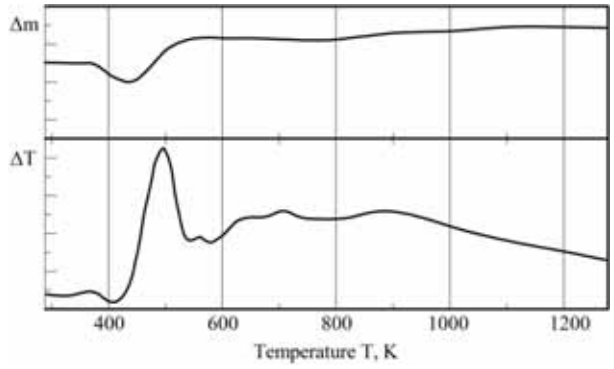


Fig. 5. Derivatogram of heating the electric arc zirconium oxide powder

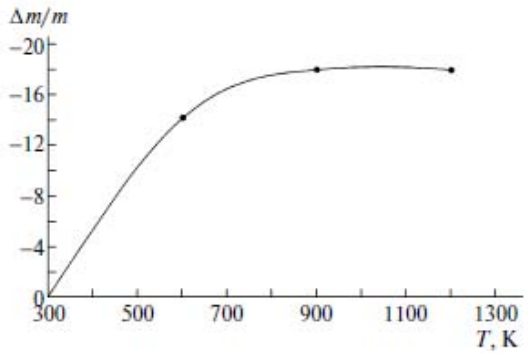


Fig. 6. Thermogravimetric curve of heating the zirconium oxide nanopowder in air

Conclusion. When comparing the experimental results obtained for titanium nitride [8] with the results obtained for zirconium oxide, we can conclude that the proposed method for producing nanopowder in the plasma of a low-pressure arc discharge is universal. This method is characterized by high manufacturability and low energy consumed for the production of a unit of output, since the total time of nanodrop generation is the statistical superposition of such processes in individual cathode spots moving spontaneously (or under the action of a magnetic field) over the cathode surface. This continuous formation of cathode spots ensures uniform cathode erosion, which results in an increase in the lifetime of the cathode and the entire setup. Although the formation of nanoparticles in the plasma of an individual cathode spot is a pulsed process ($t_p \sim 10^{-7}$ s), the operation of the setup used to implement the proposed method can be characterized as a highly productive stationary process with the continuous operation resource determined by the cathode material lifetime (100 h or more).

The produced zirconium oxide powders have an amorphous-crystalline monophase structure and a narrow granulometric composition with an average particle size of 5 nm.

Acknowledgments. This work was partly supported 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. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ, 2005. 416 p.

2. Mesyats G. A., Proskurovsky D. I. *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum.* Berlin, Springer, 1989, 293 p.

3. Saunin V. N., Telegin S. V. [Plasma Spraying Ferrite Coverage] *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 1 (53), P. 168–174 (In Russ.).

4. Gordeev Ju. I., Abkarjan A. K., Jasinskij V. B., Binchurov A. S., Vadimov V. N. [Design and Research Nanostructured firm alloys Composites with High Level Strength and Operational Performance by Modifying Nanoparticles and Thermomechanical Processing] *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 4 (56), P. 209–218 (In Russ.).

5. Miheev A. E., Girn A. V., Ivasev S. S., Evkin I. V. [Investigation of Coatings for the Spacecraft] *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 3 (49), P. 217–224 (In Russ.).

6. Takamasa Ishigaki, Ji-Guang Li. Synthesis of functional TiO_2-based nanoparticles in radio frequency induction thermal plasma. *Pure Appl. Chem.*, 2008, Vol. 80, No. 9, P. 1971–1979. doi: 10.1351/pac200880091971.

7. Barengol'ts S. A., Mesyats G. A., Shmelev D. L. Mechanism of ion flow generation in vacuum arcs. *JETP*, 2001, Vol. 93, No. 5, P. 1065–1073. doi:10.1134/1.1427117.

8. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Krushenko G. G. [Physico-chemical properties nanomodifiers based arc titanium nitride powder for polymer nanocomposite materials] *Tekhnol. Met.* 2011, No. 3, P. 16–21 (In Russ.).

9. 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.

10. 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.

11. Ushakov A. V., Karpov I. V., Fedorov L. Yu., Lepeshev A. A. Mechanical and Tribological Properties of Complex-Modified Material Based On Ultra High Molecular Weight Polyethylene. *Journal of Friction and Wear*, 2014, Vol. 35, No. 1, P. 7–11, doi: 10.3103/S1068366614010103.

12. Anders A. The fractal nature of vacuum arc cathode spots. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2005, Vol. 33, No. 5, P. 1456–1464, doi: 10.1109/TPS.2005.856488.

13. Anders A. Metal plasma immersion ion implantation and deposition: a review. *Surf. Coat. Technol.*, 1997, Vol. 93, No. 2–3, P. 158–167, doi: 10.1016/S0257-8972(97)00037-6.

14. Krinberg I. A. The ion charge-current strength relationship in stationary and pulsed vacuum discharges. *Tech. Phys. Lett.*, 2001, Vol. 27, No. 1, P. 45–48, doi: 10.1134/1.1345162.

15. Rietveld H. M. Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *J. Appl. Crystallogr.*, 1969, No. 2, P. 65–71. doi:10.1107/S0021889869006558.

16. Wiles D. B. New Computer Program for Rietveld Analysis of X-ray Powder Diffraction Patterns. *J. Appl. Crystallogr.*, 1981, No. 14, P. 149–151, doi: 10.1107/S0021889881008996.

Библиографические ссылки

1. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М. : Физматлит, 2005. 416 с.

2. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск : Наука, 1984. 256 с.

3. Саунин В. Н., Телегин С. В. Плазмонапыленные ферритовые покрытия // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С. 168–174.

4. Конструирование и исследование наноструктурированных твердосплавных композитов с повышенным уровнем прочностных и эксплуатационных характеристик за счет модифицирования наночастицами и термомеханической обработки / Ю. И. Гордеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 209–218.

5. Исследование свойств защитных покрытий для космических аппаратов / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 217–224.

6. Takamasa Ishigaki, Ji-Guang Li. Synthesis of functional TiO_2-based nanoparticles in radio frequency induction thermal plasma // *Pure Appl. Chem.* 2008. Vol. 80, no. 9. P. 1971–1979. Doi: 10.1351/pac200880091971.

7. Barengol'ts S. A., Mesyats G. A., Shmelev D. L. Mechanism of ion flow generation in vacuum arcs // *JETP*. 2001. Vol. 93, no. 5. P. 1065–1073. Doi: 10.1134/1.1427117.

8. Физико-химические свойства наномодификаторов на основе электродуговых порошков нитрида титана для полимерных нанокомпозитных материалов / А. В Ушаков [и др.] // Технология металлов. 2011. № 3. С. 16–21.

9. 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.

10. 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.

11. Mechanical and Tribological Properties of Complex-Modified Material Based On Ultra High Molecular Weight Polyethylene / A.V. Ushakov [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. 2014. Vol. 35, no. 1. P. 7–11. Doi: 10.3103/S1068366614010103.

12. Anders A. The fractal nature of vacuum arc cathode spots // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2005. Vol. 33, no. 5. P. 1456–1464. Doi: 10.1109/TPS.2005.856488.

13. Anders A. Metal plasma immersion ion implantation and deposition: a review // *Surf. Coat. Technol.* 1997. Vol. 93, no. 2–3. P. 158–167. Doi: 10.1016/S0257-8972(97)00037-6.

14. Krinberg I. A. The ion charge-current strength relationship in stationary and pulsed vacuum discharges // *Tech. Phys. Lett.* 2001. Vol. 27, no. 1. P. 45–48. Doi: 10.1134/1.1345162.

15. Rietveld H. M. Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures // *J. Appl. Crystallogr.* 1969, no. 2. P. 65–71. Doi: 10.1107/S0021889869006558.

16. Wiles D. B. New Computer Program for Rietveld Analysis of X-ray Powder Diffraction Patterns // *J. Appl. Crystallogr.* 1981, no. 14. P. 149–151. Doi: 10.1107/S0021889881008996.

© Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Shaihadinov A. A., 2015

UDC 539.21 (06)

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 491–495

STUDY OF CARBIDE FORMATION IN THE PLASMA OF A LOW-PRESSURE PULSED ARC DISCHARGE

L. Yu. Fedorov[1*], A. V. Ushakov[1], I. V. Karpov[1], A. A. Lepeshev[1,2], A. A. Shaihadinov[1]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

We examine the influence of pressure and gas mixture composition on the preparation of nanomaterials via vacuum arc sputtering of titanium cathodes in carbon-containing media. The formation of carbide phases in various gaseous atmospheres is accompanied by the formation of the low-temperature phase α-Ti (hcp lattice), characteristic of pure titanium. Carbide formation in the plasma synthesis of TiC nanoparticles is determined by the C/H ratio in the molecules of the hydrocarbons used. To raise the yield of carbon-rich carbide phases and reduce the percentage of the residual metal in the resulting nanopowders, it is necessary to use hydrocarbons with a large C/H ratio, for example, benzene and acetylene.

Keywords: titanium carbide, plasma synthesis, nanoparticles, microstructural characteristics, vacuum arc sputtering.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 491–495

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБИДОВ В ПЛАЗМЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Л. Ю. Федоров[1*], А. В. Ушаков[1], И. В. Карпов[1], А. А. Лепешев[1,2], А. А. Шайхадинов[1]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Рассмотрено влияние давления и химического состава газовой смеси при получении нанодисперсных материалов вакуумно-дуговым распылением титановых катодов в углеродсодержащих средах. Формирование карбидных фаз в атмосфере различных рассматриваемых газов происходит с образованием характерной для чистого титана низкотемпературной α-модификации с ГПУ-решеткой.

Ключевые слова: карбид титана, синтез в плазме, наночастицы, микроструктурные характеристики, вакуумное дуговое распыление.

Introduction. Currently, there is still insufficient information about the influence of gas mixture pressure and the chemical composition of individual hydrocarbons on the phase composition of Ti–C nanopowders produced by plasma synthesis. These parameters are known to play a key role in determining the stability of nanoparticle synthesis and the quality of the final product. The distinctive features of the metal dispersion process under the effect of a high-power current pulse and subsequent interaction of vacuum arc discharge (VAD) products with the ambient medium under increased pressure make it possible to extend the technological possibilities of the nanopowder preparation process.

As shown earlier [1–3], a VAD in the synthesis of metal carbides in gaseous media leads to the formation of products containing residual metals, and the resulting carbides are carbon-deficient (Ti_2C, TiC_{1-x}). The applicability of the VAD method in the synthesis of TiC, ZrC, Wc, Ta_2C, and MoC via sputtering in acetylene diluted with argon or hydrogen was demonstrated by Nazarenko [4] and Tikhonov [5], who pointed out that the most efficient hydrocarbon reagent was acetylene, because it has an extremely high stored chemical energy (226.8 kJ/mol), related to the formation of a triple bond. The participation of this bond in carbide formation increases the heat release in the reaction between the

metal and acetylene. The products of vacuum arc sputtering in methane were studied by Nazarenko [4] and Vishnevetskii [6]. The phase composition of the resultant carbide was shown to be independent of the stoichiometry of the reagents and to be determined by the equilibrium conditions in the temperature range 3200–3500 K [4].

Thus, since the concentration of active reagents is considerably higher when metals are sputtered by a vacuum arc discharge, this allows one to increase the yield of chemical compounds and vary their phase composition. To raise the carbide yield and obtain more carbon-rich phases, it is reasonable to raise the pressure in the discharge chamber, which is, however, not always justified technically. Another possibility is to use denser media, which is determined in many respects by the chemical composition of the gas mixture, that is, by the type of hydrocarbon used.

To assess the influence of gas mixture pressure and individual hydrocarbons in gas mixtures on the phase composition of nanopowders produced by a vacuum arc discharge using titanium cathodes, we prepared a number of TiC nanopowders using the Nanostructure Plasma Synthesis/Analysis System at the Siberian Federal University.

Experimental. According to previous results [7–11], the optimal arc discharge parameters for the synthesis of nanoparticles are as follows: discharge current I_d = 500 A; longitudinal magnetic field generated by a focusing coil on the cathode surface, 6366.2 A/m; the cathode for sputtering was of VT1-00 commercial titanium. The particles were deposited on a polished condensation surface of 12Kh18N9T stainless steel (2-mm-thick plate). After the vacuum chamber was pumped down to a pressure of = 1×10^{-3} Pa, a 30 % C_2H_2 + 70 % Ar gas mixture was admitted to it (in experiments aimed at assessing the effect of pressure). Before evaporation, the cathode was heated to a working temperature of 1200 K. The evaporation rate was assessed experimentally, from the reduction in cathode weight [12]. A titanium nitride nanomaterial was produced over a period of 10 min. Specific surface areas were determined by low-temperature BET argon adsorption measurements. The morphology, particle size composition, and structure of the powders were analyzed by transmission electron microscopy (TEM) on a JEOL JEM- 2100 and scanning electron microscopy (SEM) on a JEOL JSM-6490 LV.

To examine the effect of gas mixture composition on the physicochemical properties of carbide nanoparticles, we prepared materials in a series of experiments, using the following hydrocarbons as working media: methane, acetylene, benzene vapor, and toluene vapor. Evaporation was performed at 40 Pa, the optimum gas mixture pressure (see below).

The phase composition and structure of the materials were determined by X-ray diffraction on a Shimadzu XRD 7000 X-ray diffractometer (monochromated CuK_α radiation). Intensity data were collected at room temperature in the angular range 20 30°–120° with a scan step of 0.04°. Microstructural characteristics and unit-cell parameters were determined by the Rietveld profile analysis method [13].

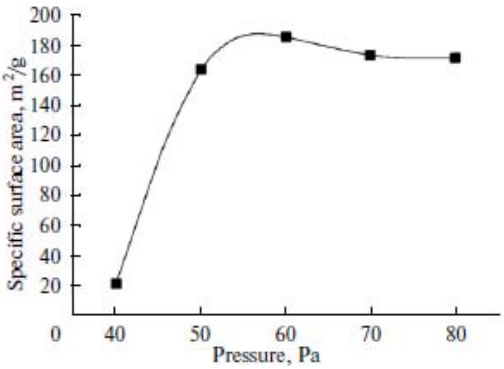


Fig. 1. Specific surface area of TiC nanopowders as a function of the pressure in the plasma reactor

Results and discussion. The formation of carbide phases at elevated reaction gas pressures is due to processes that take place directly in a plasma. The nature and rate of heat and mass exchange processes between particles of the disperse phase and the plasma flow are determined by the energy of the plasma flow, the physicochemical properties of the particles of the finely dispersed phase, the nature of the plasma-forming gas, and the nature of the interaction between the plasma flow and the finely dispersed phase. Fine titanium carbide powders can be obtained using an electric arc [4] resulting from the explosion of a melt bath on the cathode surface, because the sublimation energy of titanium is roughly equal to its ionization energy.

Fig. 1 shows the specific surface area of TiC nanopowders as a function of the pressure in the plasma reactor. As follows from these results, the specific surface area of the TiC powders rapidly reaches the highest level, 190 m^2/g at 40 Pa, and further raising the pressure causes no significant changes in specific surface area. The curve lies in a narrow range of pressures used in the synthesis of carbide nanoparticles. Above a pressure of 80 Pa, we observed arc discharge instability and frequent arc extinctions.

Analysis of TEM images (fig. 2) indicates that the products of the vacuum arc sputtering of a titanium cathode in carbon-containing gases have the form of powders consisting of spherical particles with a large surface area and a diameter from 3 to 15 nm. The micrographs show well-seen spherical particles, with much smaller particles on their surface.

It is also worth noting the presence of large, micron-sized particles, which are agglomerates of finer, submicron-sized particles, which however cannot be disaggregated.

The X-ray diffraction patterns of the powders obtained at various gas mixture compositions (fig. 3) contain peaks corresponding to α-titanium (hcp lattice). Clearly, this is due to the presence of a coarse-particle phase which resulted from cathode splashing. The lattice parameter corresponds to the reference value in the PCPDFWIN database (a = 2.951, c = 4.697 Å). α-Ti is known to be a low-temperature allotrope, existing at temperatures below 882.5 °C. At higher temperatures, it transforms into β-titanium, which has an bcc lattice [14]. Moreover, the observed broadening of the base of diffraction peaks suggests the presence of small TiC particles.

This can be understood in terms of the cathode evaporation mechanism: the cathode material is first splashed as a liquid phase in the cathode spot and then is completely evaporated in the vapor/plasma flow. In addition, the intermixing of metal vapor with an ionized carrier gas flow leads to vapor overheating, which prevents premature condensation. Next, the vapor phase is rapidly saturated with an almost completely dissociated hydrocarbon, and the hot mixture is cooled through gasdynamic expansion. Because of the high cathode temperature, the carbide formation process begins directly on the cathode surface, where the local temperature may considerably exceed the necessary threshold for direct synthesis. The final carbide formation step takes place on a substrate. Moreover, high titanium carbide synthesis temperatures in the vacuum arc sputtering process and the rapid cooling of the forming powders lead to stabilization of metastable carbides [4; 14].

The resulting titanium monocarbide, TiC, has a cubic lattice (B1 (NaCl) structure, sp. gr. Fm3m) with a lattice parameter of 0.430–0.433 nm, which depends on carbon content in the homogeneity range [4; 15]. The lattice parameter of our samples was found to increase in the order $CH_4 \rightarrow C_6H_5CH_3 \rightarrow C_6H_6 \rightarrow C_2H_2$. It is worth pointing out, however, that the lattice parameters obtained differ markedly from reference data.

Titanium carbide has the general formula TiC_{1-x} (x = 0.49–1.00) and is an interstitial phase with a broad homogeneity range. Therefore, the carbon content of the carbide (which increases in going from CH_4 to C_2H_2 and C_6H_6) and the yield of stoichiometric carbide phases depend on the nature of the hydrocarbon, namely, on the C/H ratio.

It is worth pointing out that the well-defined structure of the α-Ti samples suggests that the plasma synthesis of the carbide does not reach completion. To identify the processes responsible for this phenomenon, one should compare spectra of pure titanium and titanium carbides. It is seen that there is a rather large ratio between the peaks of titanium and titanium carbide in acetylene and benzene.

Conclusion. Thus, analysis of the above results indicates that the plasma synthesis of the carbide is more active in C_2H_2 and C_6H_6 owing to the higher density.

Note that the formation of titanium carbides has no significant effect on the nanoparticle coagulation process. This is evidenced by the fact that the particle diameter depends little on whether the powder was prepared using a VAD in carbon-containing gases, nitrogen, or argon.

The carbide formation process during vacuum arc sputtering of titanium cathodes is influenced not only by the gas mixture pressure (which is limited by the arc discharge stability) but also by the C/H ratio in the hydrocarbon molecules: increasing the C/H ratio increases the yield of carbon-reach carbide phases and reduces the percentage of the residual metal in the synthesis products. At the same time, acetylene is more attractive because the synthesis of carbide nanoparticles in a plasma reactor is more technologically attractive.

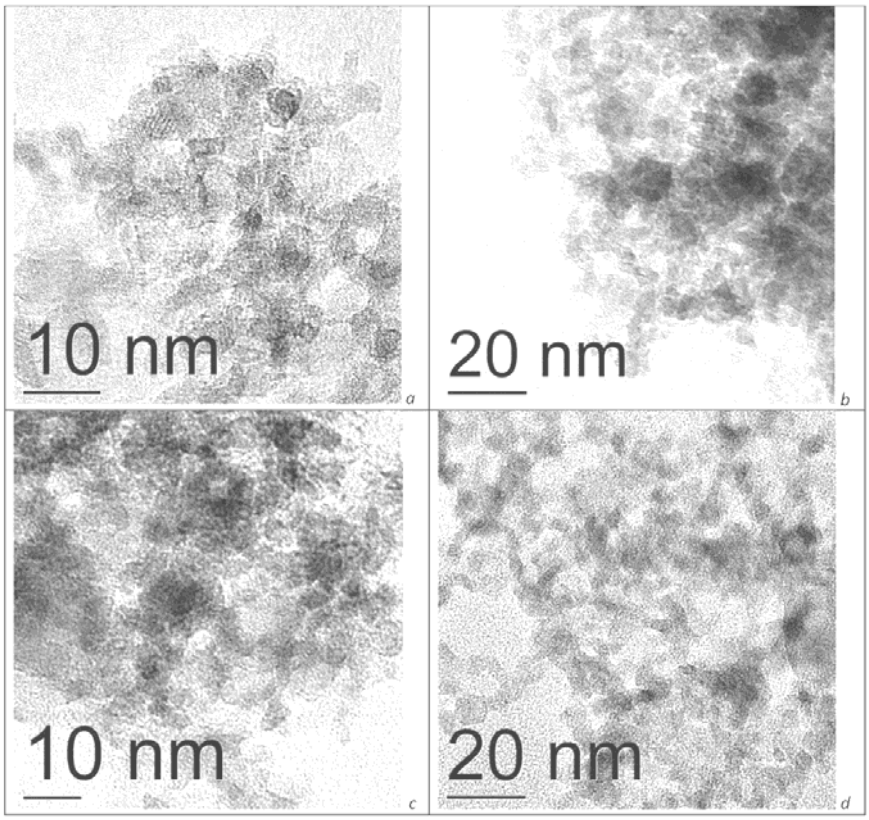


Fig. 2. Micrographs of powders produced by vacuum arc sputtering of a titanium cathode in 30 % C_2H_2 + 70 % Ar (*a*), 30 % $C_5H_5CH_3$ + 70 % Ar (*b*), 30 % C_6H_6 + 70 % Ar (*c*), and 30 % CH_4 + 70 % Ar (*d*)

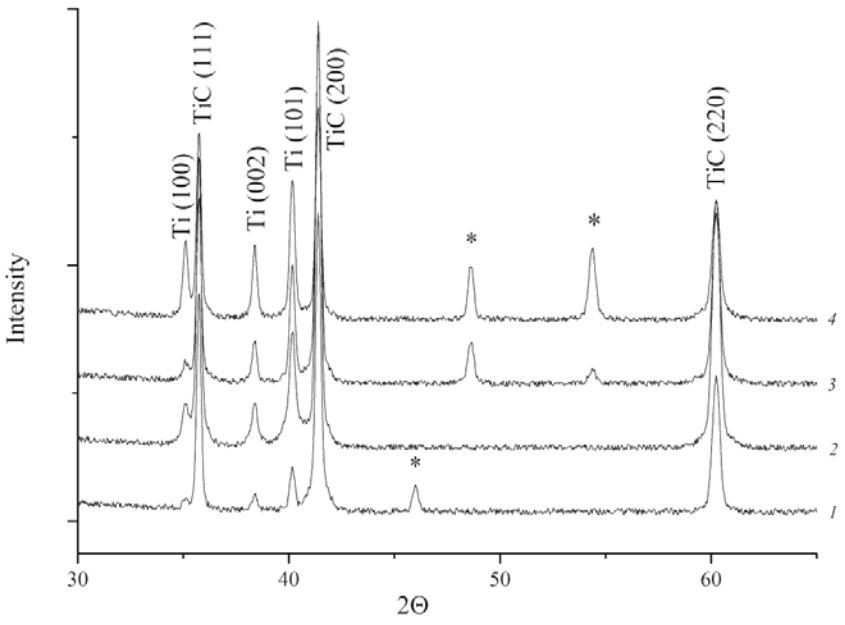


Fig. 3. Portions of X-ray diffraction patterns of freshly deposited TiC samples obtained in various gaseous atmospheres at a pressure of 40 Pa: 30 % C_2H_2 + + 70 % Ar, *a* = 0.429 nm (1); 30 % $C_5H_5CH_3$ + 70 % Ar, *a* = 0.426 nm (2); 30 % C_6H_6 + 70 % Ar, *a* = 0.428 nm (3); 30 % CH_4 + 70 % Ar, *a* = 0.425 nm (4)

Acknowledgments. This work was partly supported 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. Cook E., Siegel B. Carbide synthesis by metal explosions in acetylene. *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 1968, Vol. 30, No. 7, P. 1699–1706, doi: 10.1016/0022-1902 (68)80341-0.

2. Johnson R. L., Siegel B. Chemistry of electrical wire explosions in hydrocarbons. *J. Electrochem. Soc.*, 1968, Vol. 115, No. 1, P. 24–28, doi: 10.1149/1.2410993.

3. 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.

4. Nazarenko O. B. *Protsessy polucheniya nanodispersnykh tugoplavkikh nemetallicheskikh soedineniy i metallov metodom elektricheskogo vzryva provodnikov. Dis. dok. tehn. nauk.* [Preparation of nanoparticulate refractory nonmetallic compounds and metals by electrical wire explosions. Dr. techn. sci. diss.] Tomsk, 2006, 289 p.

5. Tikhonov D. V. *Elektrovzryvnoe poluchenie ul'tradispersnykh poroshkov slozhnogo sostava. Dis. kand. tehn. nauk.* [Preparation of ultrafine powders of complex composition by electroexplosion. Cand. techn. sci. diss.] Tomsk, 1999, 212 p.

6. Vishnevetskii I. I. *Issledovanie razlozheniya uglevodorodov v impul'snykh elektricheskikh razryadakh. Dis. kand. tehn. nauk.* [Decomposition of hydrocarbons in pulsed electric discharges. Cand. techn. sci. diss.] Tomsk, 1974, 237 p.

7. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Krushenko G. G. [Physicochemical properties of nanomodifiers based on electric arc titanium nitride powder for polymer nanocomposite materials], *Tekhnol. Met.*, 2011, No. 3, P. 16–21 (In Russ.).

8. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A. [Synthesis of titanium nitride nanopowders in a low-pressure arc discharge plasma], *Materialovedenie*, 2012, No. 3, P. 48–51 (In Russ.).

9. 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.

10. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Petrov M. I. Study of Magnetic Flux Pinning in Granular $YBa_2Cu_3O_{7-y}$/nanoZrO_2 Composites. *JETP Letters*, 2014, Vol. 99, No. 2, P. 105–109, doi: 10.1134/S002136401402009X.

11. 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.).

12. Ushakov A. V. *Poluchenie ul'tradispersnykh poroshkov v plazme dugovogo razrjada nizkogo davlenija. Dis. kand. tehn. nauk.* [Preparation of ultrafine powders in a low-pressure pulsed arc discharge plasma. Cand. techn. sci. diss.] Krasnoyarsk, 2002, 135 p.

13. Rietveld H. M. Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *J. Appl. Crystallogr*., 1969, No. 2, P. 65–71, doi: 10.1107/S0021889869006558.

14. Gusev A. I., *Strukturnye fazovyeperekhody v nestekhiometricheskikh soedineniyakh* [Structural phase transitions in nonstoichiometric compounds]. Moscow, Nauka Publ, 2005, 308 p.

15. Samsonov G. V. *Karbidy vol'frama* [Tungsten Carbides]. Kyiv, Naukova Dumka Publ, 2008, 175 p.

Библиографические ссылки

1. Cook E., Siegel B. Carbide synthesis by metal explosions in acetylene // *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1968. Vol. 30, no. 7. P. 1699–1706. Doi: 10.1016/0022-1902(68) 80341-0.

2. Johnson R. L., Siegel B. Chemistry of electrical wire explosions in hydrocarbons // *J. Electrochem. Soc.* 1968. Vol. 115, no. 1. P. 24–28. Doi: 10.1149/1.2410993.

3. 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.

4. Назаренко О. Б. Процессы получения нанодисперсных тугоплавких неметаллических соединений и металлов методом электрического взрыва проводников : дис. … д-ра техн. наук. Томск, 2006. 289 с.

5. Тихонов Д. В. Электровзрывное получение ультрадисперсных порошков сложного состава : дис. … канд. техн. наук. Томск, 1999. 212 с.

6. Вишневецкий И. И. Исследование разложения углеводородов в импульсных электрических разрядах : дис. … канд. техн. наук. Томск, 1974. 237 с.

7. Физико-химические свойства наномодификаторов на основе электродугового порошка нитрида титана для полимерных нанокомпозиционных материалов / А. В Ушаков [и др.] // Технология металлов. 2011. № 3. С. 16–21.

8. Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А. Особенности синтеза нанопорошков нитрида титана в плазменной среде дугового разряда низкого давления // Материаловедение. 2012. № 3. С. 48–51.

9. 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.

10. Study of Magnetic Flux Pinning in Granular $YBa_2Cu_3O_{7-y}$/nanoZrO_2 Composites / A. V. Ushakov [et al.] // *JETP Letters*. 2014. Vol. 99, no. 2. P. 105–109. Doi: 10.1134/S002136401402009X.

11. Исследование состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 216–219.

12. Ушаков А. В. Получение ультрадисперсных порошков в плазме дугового разряда низкого давления : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2002. 135 с.

13. Rietveld H. M. Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures // *J. Appl. Crystallogr*. 1969. No. 2. P. 65–71. Doi: 10.1107/S0021889869006558.

14. Гусев А. И., Ремпель А. А. Структурные фазовые переходы в нестехиометрических соединениях. М. : Наука, 2005. 318 с.

15. Самсонов Г. В., Витрянюк В. К., Чаплыгин Ф. Ч. Карбиды вольфрама. Киев : Наукова думка, 2008. 173 с.

© Fedorov L. Yu., Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Shaihadinov A. A., 2015

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

УДК 658.7

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 498–502

ОЦЕНКА ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА

Е. В. Белякова

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

Развитие космического потенциала России является одним из приоритетов государственной политики. Результаты космической деятельности должны давать большую практическую отдачу, служить инновационному развитию России, решению самого широкого круга прикладных задач в промышленности, медицине, телекоммуникациях, на транспорте, укреплению безопасности Российской Федерации и её конкурентоспособности в мире. Большую роль в решении поставленных задач играет реализация возможностей и логистического потенциала предприятий РКО. Стоит отметить, что сравнительно недавно стали отдельно рассматривать и анализировать логистический потенциал экономических систем, поэтому до настоящего времени происходит формирование понятийного и методологического аппарата, описывающего данную категорию. Предложено авторское определение логистического потенциала. Обоснован выбор индикаторного метода для оценки логистического потенциала предприятия. Оценка производится на основе системы показателей, характеризующей три основные группы параметров: логистическую систему, логистическую инфраструктуру и эффект от инвестиций в логистику, которые в комплексе наиболее полно характеризуют логистические процессы и операции, эффективность имеющихся объектов логистической инфраструктуры и активов, а также эффект от вложения финансовых ресурсов в оптимизацию логистической системы предприятия. На основе системы показателей, характеризующих логистический потенциал предприятий РКО, в статье предлагается методика его оценки. Использование предложенной методики поможет предприятиям РКО правильно организовать работу служб логистики и проводить оценку эффективности их функционирования. Анализ показателей позволяет увидеть слабые зоны логистики предприятия и учесть их при формировании стратегии дальнейшего развития данного предприятия. Основным недостатком индикаторного метода при оценке логистического потенциала предприятия РКО является субъективность значений весовых коэффициентов ввиду использования экспертных оценок. Снизить долю субъективизма возможно за счет привлечения большего количества высококвалифицированных специалистов в качестве экспертов.

Ключевые слова: предприятия РКО, логистический потенциал, методы оценки, индикаторный метод.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 498–502

ASSESSMENT OF LOGISTICAL POTENTIAL OF THE ENTERPRISE OF ROCKET-SPACE INDUSTRY ON THE BASIS OF INDICATOR METHOD

E. V. Belyakova

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

The space potential development of Russia is one of the priorities of the state policy. The space activity results should give more practical impact, to serve innovative development of Russia, the solution of a wide range of applied problems in industry, in the medical field, telecommunications, transport, strengthening security of the Russian Federation and its competitiveness in the world. A big role in solving the problems is to implement opportunities and logistics potential of enterprises in the rocket-space industry. It is worth noting that, the logistics potential of economic systems has begun to be considered and analyzed separately recently, so at present time the formation of conceptual and methodological apparatus which describing this category is transpired. The article proposed the author's definition of logistics potential. The choice of the indicator methods for estimating the logistic potential of enterprise is justified. The assessment is based on a system of indicators, characterizing the three main groups of parameters: logistics system, logistics infrastructure and the effect investment in logistics, which most fully characterize logistics processes and operations, the effectiveness of existing logistics infrastructure and assets, as well as the effect of investment the

financial resources in optimization of logistics system in the company. The article proposes a methodology of assessment on the basis of a system of indicators, characterizing the logistic potential of enterprises rocket-space industry. Using this methodology will help enterprises of rocket-space industry to organize logistics and assess the effectiveness of their functioning. The indicators analysis allows to see the weak areas of logistics enterprises and to take into account in developing strategies for further development of this company. The main disadvantage of indicator method in logistic potential evaluation of enterprises rocket-space industry is the values a weight coefficients subjectivity in view of the expert assessments use. It is possible to reduce the share of subjectivity by attracting more highly qualified specialists as experts.

Keywords: enterprises of rocket-space industry, logistics potential, assessment methods, the indicator method.

Введение. Сегодня, когда использование конкретных возможностей ракетно-космических разработок стало уже обычной практикой для многих областей науки, оборонно-промышленного комплекса и народного хозяйства, эффективное развитие отечественной космонавтики приобретает все большую актуальность, особенно для поддержания обороноспособности и конкурентоспособности России в мире [1].

Достижение высоких результатов РКО в прошлом обеспечивалось действием ряда факторов [2]: отрасль имела централизованную систему управления, пользовалась привилегией приоритетного ресурсного обеспечения (финансового, кадрового, материально-технического), развивалась по сбалансированным текущим и перспективным планам и целевым программам, внутри отрасли специфическими (неэкономическими) методами поддерживалась конкуренция различных научно-конструкторских школ и производств, проводилась научно-техническая политика единых правил, требований, государственных и отраслевых стандартов, норм, систем сертификации и т. д. В настоящее время половина предприятий ракетно-космической отрасли (РКО) преобразованы из государственных унитарных предприятий в акционерные общества, следовательно, наряду с целевыми государственными программами необходима коммерциализация космической деятельности.

Ракетно-космическая промышленность – одна из наиболее сложных и наукоемких отраслей машиностроения. В ней широко используются межотраслевые поставки, в которых участвуют почти все отрасли народного хозяйства [3]. Повышение качества продукции и сокращение сроков ее производства – задача особо актуальная в аэрокосмической промышленности. Это, в свою очередь, предъявляет жесткие требования ко всей цепочке поставщиков и подрядчиков, начиная от производителей комплектующих, прототипов и инструментальной оснастки для серийного выпуска комплектующих и заканчивая поставщиками монтажной оснастки и приспособлений для сборочных заводов.

Требования, предъявляемые ко всем предприятиям, занятым в аэрокосмическом секторе, уникальны. Их изделия должны обеспечивать высочайшие эксплуатационные характеристики при необсуждаемо жестких параметрах надежности. При этом аэрокосмические предприятия должны постоянно сокращать себестоимость своих изделий, сроки их разработки и организации серийного производства.

Одним из решений данной задачи для предприятий РКО является грамотное управление имеющимися у него ресурсами, реалистичная оценка текущего состояния компании и возможностей ее развития, т. е. ее потенциала. Оценка логистического потенциала прежде всего необходима для поиска путей снижения себестоимости продукции, определения сильных и слабых сторон в логистической системе предприятия, направлений для ее дальнейшего развития и совершенствования.

Современные тенденции в оценке логистического потенциала предприятия. В настоящее время наблюдается становление основ теории и методологии, принципов, понятий и терминов, используемых при оценке логистического потенциала. Существенный вклад в изучение логистического потенциала экономических систем внесли Г. Г. Виногоров [4], А. Н. Горяинов [5], С. М. Исиков [6], Н. П. Кузнецова [7], И. В. Петенко [6], Т. Н. Скоробогатова [8], О. А. Фрейдман [9; 10] и другие отечественные и зарубежные исследователи. Вместе с тем некоторые принципиальные вопросы, связанные с методологией оценки логистического потенциала, остаются малоисследованными. Стоит отметить, что сравнительно недавно стали отдельно рассматривать и анализировать логистический потенциал экономических систем, поэтому до настоящего времени происходит формирование понятийного и методологического аппарата, описывающего данную категорию.

С нашей точки зрения, логистический потенциал – это имеющиеся в распоряжении средства логистического назначения, объекты логистической инфраструктуры, резервы оптимизации логистических процессов, которые могут быть мобилизованы для достижения целей организации.

Опыт отечественных и зарубежных исследователей в области оценки логистического потенциала экономической системы показал, что слабой стороной существующих методов является отсутствие комплексного подхода и четкого понимания цели оценки и трактовки полученных результатов [6–8; 11].

Индикаторный метод как основа оценки логистического потенциала. Анализ научной литературы позволяет сделать вывод, что в наибольшей степени требованиям системной оценки производственно-экономического потенциала отвечают возможности индикаторного метода. Суть его заключается в разработке и анализе системы индикаторов, позволяющих в формализованном виде выделить количественные и качественные характеристики исследуемого объекта [12]. Для исследования логистического потенциала предлагается модификация существующих моделей индикаторного метода путем включения в его структуру

относительных значений индикаторов, вычисляемых путем сопоставления абсолютных значений индикаторов с их критериальной величиной. Такой подход позволяет получить сопоставимые оценки потенциала как отдельных его элементов, так и общих характеристик по исследуемым отраслям и предприятиям.

К достоинствам индикаторного метода в целом можно отнести, во-первых, возможность учета практически всех факторов и условий, влияющих на логистический потенциал, включая и организационно-экономические. Во-вторых, на основе его использования можно произвести сравнительную оценку логистического потенциала предприятий, в том числе с различной технологической и отраслевой специализацией [13; 14]. Этот подход позволяет всесторонне оценить потенциал предприятий, их конкурентоспособность не только на отраслевом, но и на межотраслевом уровнях. Такая информация очень важна для принятия оптимальных управленческих решений в конкретных ситуациях. Кроме того, интерес к объективным и достоверным данным о потенциальных возможностях предприятий со стороны субъектов рыночных отношений определяет большую практическую значимость указанного метода.

Проводить оценку логистического потенциала предприятия следует по показателям, характеризующим состояние логистической системы и инфраструктуры предприятия. Для этого целесообразно использовать интегральный индикатор, описывающий состояние всех его структурных элементов, что нашло отражение в предложенной методике.

Методика оценки логистического потенциала предприятия РКО. На первом этапе производится сбор базовой информации о предприятии РКО, которая призвана показать по возможности наиболее полную картину окружения компании и исключить из дальнейшего анализа факторы, воздействовать на которые предприятию не представляется возможным. Также данное подготовительное исследование позволяет выделить тот сегмент рынка, в котором логистический потенциал входящих в него компаний с наибольшей достоверностью может подвергаться сравнению [15].

После сбора первичной информации производится сама процедура оценки логистического потенциала. Разрабатывается система показателей, характеризующая три основные группы параметров: логистическую систему, логистическую инфраструктуру и эффект от инвестиций в логистику. Выбор именно этих групп обусловлен тем, что в комплексе они наиболее полно характеризуют логистические процессы и операции (такие как сбыт, закупки, распределение, сервисное сопровождение и др.), эффективность имеющихся объектов логистической инфраструктуры и активов (склады, технопарки, коммуникации и т. п.) и эффект от вложения финансовых ресурсов в оптимизацию логистической системы предприятия. Примером могут служить показатели, представленные в таблице, но возможно и внесение в список некоторых других факторов, которые по мнению руководства более полно описывают логистический потенциал конкретной компании и подходят для конкретной ситуации.

Показатели оценки логистического потенциала предприятия

Объект характеристики		Показатель
Элементы логистической инфраструктуры	Склад	Оборачиваемость товарных запасов
		Грузонапряженность 1 м² общей площади склада
		Соотношение входящих и выходящих материальных потоков
		Коэффициент использования склада
		Запасоотягощенность основных средств
	Транспорт	Коэффициент использования грузоподъемности (грузовместимости) транспортного средства
		Коэффициент использования транспорта по календарному времени
		Уровень автоматизации логистических операций
Элементы логистической системы	Система сбыта	Доля поставок готовой продукции с претензиями клиентов
		Доля времени задержки во времени поставки готовой продукции
	Организация закупочной деятельности	Коэффициент компьютеризации управления заказами
		Коэффициент оптимальности размера поставки
		Доля бракованных материалов
		Доля времени задержки во времени поставки материалов
	Производственная логистика	Доля общих логистических издержек в себестоимости продукции
		Продуктивность (отдача) логистических затрат
Инвестиции в логистическую систему	Отношение операционных логистических издержек на единицу инвестированного капитала	
	Возврат на инвестиции в логистическую инфраструктуру	

Основные и дополнительные показатели должны отвечать определенным условиям, они должны быть:

1) актуальными для исследуемого сегмента − принадлежность к определенной отрасли и специфика бизнеса расставляют акценты и отсеивают очевидно неиспользуемые показатели. Список критериев вполне может быть расширен на основании решения экспертов, проводящих процедуру оценки, если для данного сегмента имеющиеся критерии не описывают полную картину состояния логистической системы;

2) измеримыми для каждого из входящих в сегмент предприятий − отсутствие определенных количественных данных не позволит провести оценку по типовому шаблону и сделает результаты субъективными, что в корне противоречит цели проведения оценки;

3) исчерпывающими – показатели в обязательном порядке должны описывать все элементы логистической системы предприятия, отражать как текущее состояние логистического потенциала, так и оптимальное, максимально желательное.

После отбора и утверждения списка анализируемых критериев и выбора характеризующих их расчетных показателей на основе экспертного метода определяются коэффициенты значимости каждого из единичных показателей, показателей подгруппы и группы.

Следующим этапом в предложенной методике является расчет значений выбранных параметров, при этом сначала рассчитываются значения каждого единичного параметра, затем проводится сравнение показателей с пороговыми уровнями.

В классической методике индикаторного анализа пороговые значения задаются сравнением с нормативами, указанными в специальных справочниках, или со средними значениями параметра в отрасли [12]. Таким образом, рассчитав значения показателей для участников рынка, вычисляется средний и максимальный уровень значения показателя. В зависимости от уровня, в который попадает значение показателя, рассчитанного для конкретного предприятия, показателю присваивается соответствующий рейтинг:

– от 0 до 1 – низкий уровень развития логистического потенциала;

– от 1 до 2 – средний уровень развития логистического потенциала;

– от 2 до 3 – высокий уровень развития потенциала.

При высоком уровне предприятие находится в состоянии абсолютного равновесия по всем составляющим в соответствии со всеми критериями оценки. При среднем уровне успешному развитию предприятия не мешают имеющиеся проблемы, оно находится в среднем диапазоне относительно лидера отрасли или нормативных значений показателя. При низком уровне имеют место хронические нарушения большинства параметров всех функциональных составляющих, возникают проблемы с обеспечением деятельности предприятия, логистическая система нестабильна, наблюдается неэффективное использование ресурсов.

Затем полученные балльные оценки умножаются на весовой коэффициент значимости индикатора в подгруппе и группе. Значение интегрального показателя логистического потенциала предприятия рассчитывается путем сложения произведений каждого группового индикатора, характеризующего логистическую систему, логистическую инфраструктуру и инвестиции в логистику, на весовой коэффициент значимости группы:

$$ЛП = k_1\,П_{лс} + k_2 П_{ли} + k_3 Э_{ил},$$

где ЛП – логистический потенциал предприятия; k_1, k_2, k_3 – весовые коэффициенты значимости; $П_{лс}$ – потенциал логистической системы, $П_{ли}$ – потенциал логистической инфраструктуры; $Э_{ил}$ – эффект инвестиций в логистику.

На последнем этапе сравниваются конечные значения логистического потенциала анализируемого предприятия с остальными участниками рынка для определения конкурентной позиции компании. Большое практическое значение имеет сравнение логистического потенциала предприятия с аналогичными значениями предыдущих периодов, что позволяет судить о динамике развития потенциала и эффекте, который это развитие принесло компании за несколько лет.

Заключение. Использование предложенной методики поможет предприятиям РКО правильно организовать работу служб логистики и проводить оценку эффективности их функционирования. Анализ значений единичных и групповых показателей позволяет увидеть слабые зоны логистики предприятия и учесть это при формировании стратегии дальнейшего развития данного предприятия.

Апробация индикаторного метода при оценке логистического потенциала предприятия показала, что основным недостатком предложенного метода является субъективность значений весовых коэффициентов ввиду использования экспертных оценок. Снизить долю субъективизма возможно за счет привлечения большего количества высококвалифицированных специалистов в качестве экспертов.

Библиографические ссылки

1. Совещание о перспективах развития космической отрасли [Электронный ресурс]. URL: http://www.federalspace.ru/main.php?id=2&nid=20027 (дата обращения: 05.12.2014).

2. Загоруйко И. Ю. Государственное управление в области авиастроения (административно-правовой аспект) // Вестник Пермского университета. 2011. Вып. 1(11). С. 54–57.

3. Космическая промышленность РФ: тенденции, перспективы, новые риски. [Электронный ресурс]. URL: http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/171-2010-10-25-08-18-49.html (дата обращения: 05.12.2014).

4. Виногоров Г. Г. Анализ логистического потенциала промышленного предприятия // Экономика и управление. 2009. № 4(20). С. 100–109.

5. Горяинов А. Н. Транспортный потенциал и резервирование в системе управления логистикой предприятия [Электронный ресурс]. URL: http://www/logistics-gr.com/index.php?option (дата обращения: 17.09.2014).

6. Петенко И. В., Исиков С. М. Логистический потенциал коммерческого посредничества // Научные труды ДонНТУ. Серия экономическая. 2004. № 80. С. 88–93.

7. Кузнецова Н. П. Логистический потенциал как фактор инновационной активности региона // Вестник ОрелГИЭТ. 2012. № 1(19). С. 73–80.

8. Скоробогатова Т. Н. Логистический потенциал предприятия сервиса // Вестник Российской экономической академии им. Г. В. Плеханова. 2006. № 2. С. 87–94.

9. Фрейдман О. А. Анализ логистического потенциала региона. Иркутск : ИрГУПС, 2013. 164 с.

10. Фрейдман О. А. Методы критериальной оценки логистического потенциала региона // Российское предпринимательство. 2013. № 3 (225). С. 127–130.

11. Методы оценки потенциала предприятия [Электронный ресурс]. URL: http://neopal.ru/251-pastyr-3d-priest-3d.html (дата обращения: 17.09.2014).

12. Бродецкий Г. Л. Экономико-математические методы и модели в логистике: потоки событий и системы обслуживания : учеб. пособие. М. : Академия, 2011. 272 с.

13. Лукинский В. С. Модели и методы теории логистики : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2003. 219 с.

14. Плоткин Б. К., Делюкин Л. А. Экономико-математические модели в логистике : учеб. пособие. СПб. : СПбГЭУФ, 2010. 96 с.

15. Пухова О. И. Коммерческая логистика: Логистика складирования : учеб. пособие. Хабаровск : РИЦ ХГАЭП, 2010. 398 с.

References

1. *Soveshchanie o perspektivakh razvitiya kosmicheskoy otrasli* [A meeting on the future of the space industry development]. Available at: http://www.federalspace.ru/main.php?id=2&nid=20027 (accessed 05.12.2014).

2. Zagoruyko I. Yu. [State administration in the field of aircraft construction (administrative-legal aspect)]. *Vestnik Permskogo universiteta*. 2011, No. 1(11), P. 54–57 (In Russ.).

3. *Kosmicheskaya promyshlennost' RF: tendentsii, perspektivy, novye riski.* [Space industry the Russian Federation: trends, prospects, and risks]. Available at: http://www.space-ins.ru/index.php/kategoria2/171-2010-10-25-08-18-49.html (accessed 05.12.2014).

4. Vinogorov G. G. [The analysis of the logistics potential of industrial enterprises]. *Ekonomika i upravlenie.* 2009, No. 4(20), P. 100–109 (In Russ.).

5. Goryainov A. N. *Transportnyy potentsial i rezervirovanie v sisteme upravleniya logistikoy predpriyatiya* [Transport capacity and redundancy in the system management of logistics enterprises]. Available at: http://www/logistics-gr.com/index.php?option. (accessed 17.09.2014).

6. Petenko I. V., Isikov S. M. [Logistics potential commercial mediation]. *Nauchnye trudy DonNTU. Seriya: ekonomicheskaya*. 2004, No. 80, P. 88–93 (In Russ.).

7. Kuznetsova N. P. [Logistics capacity as a factor of regional innovative activity]. *Vestnik OrelGIET*. 2012, No. 1(19), P. 73–80 (In Russ.).

8. Skorobogatova T. N. [Logistic potential of enterprise service]. *Vestnik Rossiyskoy ekonomicheskoy akademii im. G. V. Plekhanova*. 2006, No. 2, P. 87–94 (In Russ.).

9. Freydman O. A. *Analiz logisticheskogo potentsiala regiona* [The analysis of logistics potential in the region]. Irkutsk, IrGUPS publ., 2013, 164 p.

10. Freydman O. A. [Methods of criteria-based evaluation of the logistics potential of the region]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo.* 2013, No. 3 (225), P. 127–130 (In Russ.).

11. *Metody otsenki potentsiala predpriyatiya* [Methods of estimation of enterprise potential]. Available at: http://neopal.ru/251-pastyr-3d-priest-3d.html (accessed 17.09.2014).

12. Brodetskiy G. L. *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli v logistike: potoki sobytiy i sistemy obsluzhivaniya* [Economic-mathematical methods and models in logistics: the flow of events and services]. Moscow, Academia publ., 2011. 272 p.

13. Lukinskiy B.C. *Modeli i metody teorii logistiki* [Models and methods of the theory of logistics]. St.Petersburg, Piter publ., 2003. 219 p.

14. Plotkin B. K., Delyukin L. A. *Ekonomiko-matematicheskie modeli v logistike* [Economic-mathematical models in logistics]. St.Petersburg, SPbGJeUF publ, 2010, 96 p.

15. Pukhova O. I. *Kommercheskaya logistika: Logistika skladirovaniya* [Commercial logistics: warehousing logistics]. Habarovsk., RIC HGAJeP publ., 2010, 398 p.

© Белякова Е. В., 2015

УДК 338.45.01

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 503–508

ВЫБОР ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА НАУКОЕМКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. В. Еремеева

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

Для аэрокосмической отрасли, на наукоемких предприятиях которой используются уникальные высокотехнологичные производства, передовые достижения фундаментальной науки и прикладных исследований, реализуются прорывные технологии, задачи, связанные с развитием инновационной деятельности приобретают особое значение.

Успешность инновационной деятельности любого наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности определяется его инновационным потенциалом, который в общем виде характеризует способность предприятия самостоятельно решать новые задачи, связанные с производством инновационной продукции, реализацией инновационных проектов, внедрением новых технологий.

Целью данного исследования является обоснование методического инструментария управления развитием инновационного потенциала наукоемких предприятий ракетно-космической промышленности.

Задачами исследования являются: 1) разработка концептуального подхода к управлению развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности, включающего в себя постановку проблем, формулирование положений и принципов формирования системы управления развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности; 2) обоснование выбора инструментов управления развитием инновационного потенциала, учитывающих особенности текущей деятельности наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности.

Выделены частные принципы формирования системы управления развитием инновационного потенциала: принцип диффузии; принцип воспроизводимости инновационного потенциала на основе коммерциализации; принцип окупаемости; принцип опережения; принцип устойчивости.

В исследовании, опираясь на методологию использования метода дерева целей, процесс решения задач управления развитием инновационного потенциала ракетно-космической промышленности предлагается разбить на шесть последовательных этапов, результаты реализации которых будут учитываться в программе инновационного развития предприятия.

Этапы управления развитием инновационного потенциала включают: формирование альтернативных вариантов инновационного развития наукоемкого предприятия на среднесрочную перспективу; определение необходимого инновационного потенциала для выбранного варианта инновационного развития наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности; расчет величины прироста инновационного потенциала по составляющим; выбор инструментов развития инновационного потенциала; сравнительный анализ необходимого инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности; реализацию инновационного потенциала.

Ключевые слова: инновационное развитие, наукоемкие предприятия, ракетно-космическая промышленность, инновационный потенциал.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 503–508

SELECTING MANAGEMENT TOOLS DEVELOPMENT OF INNOVATIVE POTENTIAL OF HIGH TECHNOLOGY ENTERPRISE OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY

S. V. Eremeeva

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

The tasks of development of innovative activity are particularly important for aerospace industry, where high-tech enterprises use unique high-tech industries, progressive advances within the area of fundamental research and applied research, realize cross-cutting technologies.

The success of innovative activity of any high-tech enterprise of rocket and space industry is defined by its innovative potential, which generally characterizes the company's ability to independently solve new tasks, associated with the production of innovative products, the implementation of innovative projects, and introduction of new technologies.

The aim of present study is foundation of the methodological tools of management of development of innovative potential of high-tech enterprises of the rocket and space industry.

The objectives of the study are: 1) development of a conceptual approach to the management of the development of innovative potential of high technology enterprise of the rocket and space industry, including the formulation of problems, formulation of the provisions and principles of management system generating of development of innovative potential of high-tech enterprise of the rocket and space industry; 2) foundation of choice of management tools development of innovative potential, taking into account the features of the current activities of the high-technology enterprise of the rocket and space industry.

In the research the private principles of management system development of innovative potential are defined: the principle of diffusion; the principle of reproducibility of innovation potential through the commercialization; principle of payback; principle of an advancing; principle of stability.

The process of solving the problems of development of innovative potential of the rocket and space industry, supporting the methodology of using the tree of objectives method, is suggested to break into six consecutive stages, the results of which realization will be considered in the program of innovative development of the enterprise.

The stages of management of development of innovative potential include: formation of alternative options of innovative development of the high-tech enterprise on medium-term prospect; determination of necessary innovative potential for the chosen option of innovative development of the high-tech enterprise of the space-rocket industry; calculation of size of a gain of innovative potential for components; choice of instruments of development of innovative potential; comparative analysis of necessary innovative capacity of the high-tech enterprise of the space-rocket industry; realization of innovative potential.

Keywords: innovative development, high-tech companies, rocket and space industry, innovation potential.

Введение. На современном этапе развития Российской Федерации разработка и практическая реализация стратегии социально-экономического развития, направленная на формирование инновационной экономики, стала задачей первостепенной важности [1; 2]. Для серьезного экономического роста необходимы механизмы создания новых, инновационных видов продукции, работ и услуг, на базе еще не утраченного научно-технического и производственного потенциала в отдельных высокотехнологичных и наукоемких производствах.

В России функционирующий в советский период единый научно-технологический комплекс, включающий фундаментальную, прикладную отраслевую науку и производство, в годы реформ был существенным образом деформирован. Отраслевая наука, как связующее звено между фундаментальными, поисковыми исследованиями и производством, оказалась практически разрушена. Вследствие чего часть функций по организации прикладных исследований в интересах создания перспективной продукции и технологий предприятиям пришлось взять на себя. Таким образом, в результате данных изменений происходит становление нового типа организации в России – наукоемкого предприятия, которое рассматривается отечественными учеными в качестве важнейшего фактора подъема национальной экономики.

Определение понятий «наукоемкое предприятие», «инновационный потенциал наукоемкого предприятия РКП». Понятие наукоемких отраслей и производств в экономической науке появилось примерно три десятилетия назад. Однако несмотря на то, что в течение этого периода вышло множество научных трудов, посвященных данной тематике, основная терминология пока не устоялась. Отнесение отрасли или производства к числу наукоемких либо высокотехнологичных достаточно условно.

В своем исследовании автор представляет собственное уточненное понятие «наукоемкое предприятие», под которым предлагается понимать научно-производственную организацию, целью деятельности которой является разработка и производство наукоемкой продукции, а отличительными особенностями выступают высокая доля затрат на исследования и разработки, высокий уровень квалификации персонала и применяемых технологий.

Под количественными критериями, по которым предприятие можно отнести к наукоемким, понимаются следующие:

1) высокая доля внутренних затрат на исследования и разработки в объеме затрат на производство и реализацию продукции (более 3,5 %) [3];

2) высокая доля наукоемкой и высокотехнологичной продукции в общем объеме выпуска продукции предприятия (более 50 %);

3) высокий технологический уровень производства, в значительной степени базирующийся на технологиях пятого и последующих технологических укладов.

Качественными характеристиками наукоемких предприятий РКП являются следующие:

– выполняемая наукоемким предприятием важнейшая функция системного интегратора исследований и разработок, результаты которых реализуются в создаваемой наукоемкой продукции;

– наличие в структуре предприятия опытно-экспериментального производства;

– развитое сетевое взаимодействие с поставщиками комплектующих, а также научными, проектными и образовательными организациями, во взаимоотношениях с которыми наукоемкое предприятие, как правило, выступает заказчиком продукции или услуг;

– высокий образовательный уровень работников;

– значительная доля персонала, занятого научными исследованиями и конструкторско-технологическими разработками, в общей численности работников предприятия.

Ракетно-космическая промышленность (РКП) является одной из базовых отраслей оборонно-промышленного комплекса (ОПК) и характеризуется высокой долей наукоемких и высокотехнологичных производств, продукции и услуг. Отрасль исторически обладает уникальным инновационным ракетно-космическим потенциалом, позволяющим решать задачи стратегического назначения по совершенствованию и развитию ракетно-космической техники (РКТ) в целях национальной безопасности, социально-экономического развития страны, развития науки и международного сотрудничества, обеспечения гарантированного доступа и необходимого присутствия РФ в космическом пространстве. Развитие РКП – один из главных приоритетов государственной политики России, определяющий национальный статус и влияние нашей страны в мире как высокоразвитого в научном и технологическом плане государства. В 2011 г. доля ракетно-космической промышленности России в общемировом производстве ракетно-космической техники составила 10,7 % [4].

Необходимо отметить, что космическая деятельность в мире развивается бурными темпами, и сегодня более 120 стран участвуют в космической деятельности, а в 60 странах уже созданы космические агентства и существуют те или иные космические программы. При этом развитие международного рынка происходит очень динамично: за пять последних лет он вырос со 170 млрд долл. до 250 млрд, и такие тенденции прослеживаются и далее. При этом сектор производства ракетно-космической техники сегодня составляет 72 млрд долл., и доля России здесь составляет чуть более 10 %. Российская Федерация контролирует более 30 % средств обеспечения пусковых услуг в мире, и по производству космических аппаратов наша доля сегодня – 7 %. Остальной же рынок (более 115 млрд руб.) – это доходы от операторов услуг: телевидение, Интернет, телекоммуникации; чуть более 50 млрд – это наземная аппаратура по приёму космической информации, по разным оценкам доля России на этом рынке – от 1 до 1,7 % [4–7].

Согласно утвержденной государственной программе по развитию космической отрасли [5] основная проблема РКП заключается в несоответствии возможностей космической промышленности новым требованиям государства и мирового космического рынка.

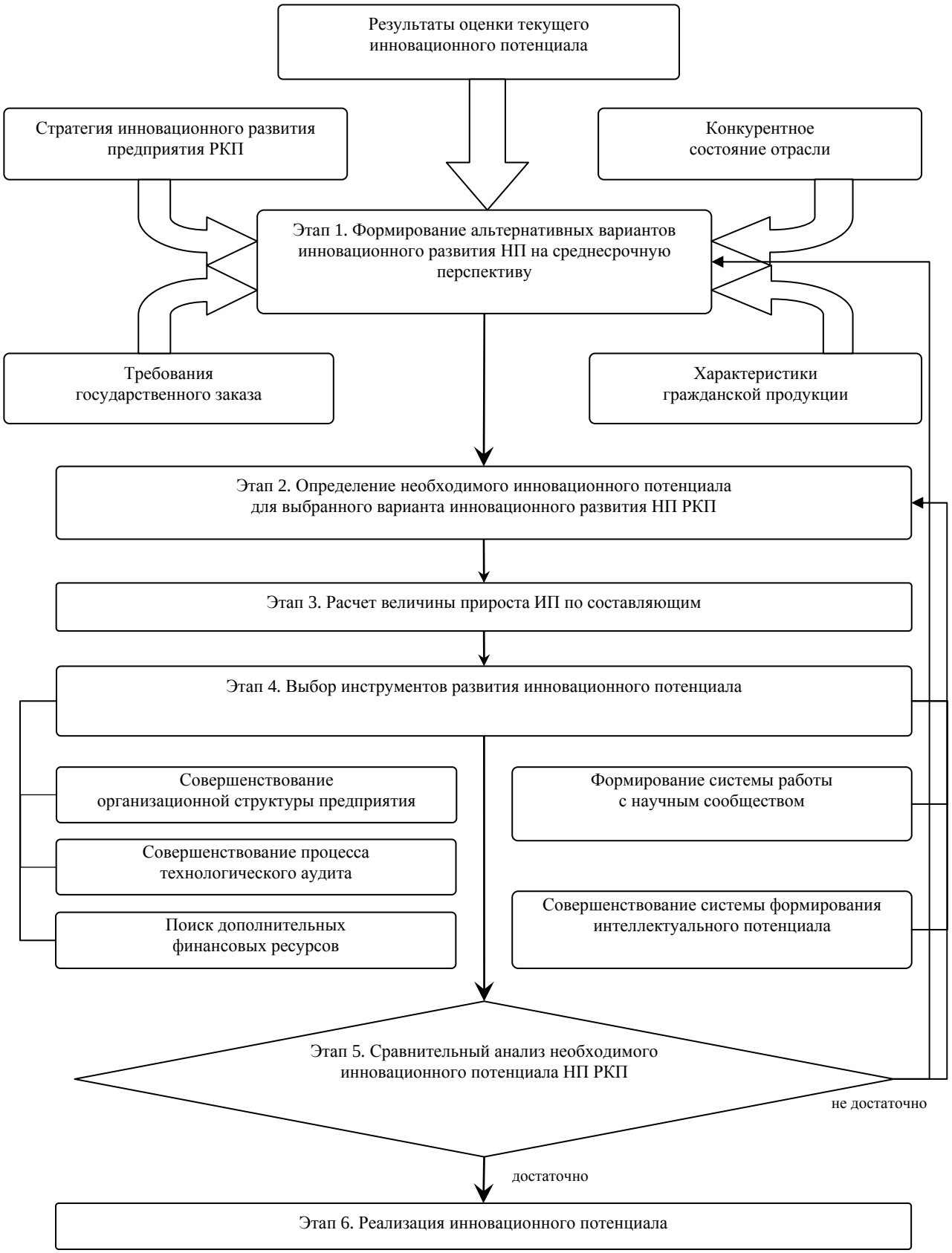
В современных быстроизменяющихся внешних условиях инновационное развитие рассматривается как единственный способ повышения конкурентоспособности производимой продукции, поддержания высоких темпов и обеспечения устойчивого развития наукоемких предприятий. Необходимость непрерывного инновационного развития наукоемких предприятий постоянно предъявляет новые требования к содержанию, организации, формам и инструментам инновационной деятельности, одним из которых является инновационный потенциал.

В исследовании автор придерживается следующего понятия «инновационный потенциал наукоемкого предприятия РКП»: это способность предприятия создавать перспективные образцы ракетно-космической техники, выражающаяся в наличии специальных компетенций в области проведения исследований, проектно-конструкторских, технологических работ; задела научно-технических разработок, развитой материально-технической базы для отработки, испытаний и производства РКТ; квалифицированного персонала; современной системы управления инновационной деятельностью [8; 9]. Отличительной особенностью данного определения является тот факт, что первоочередной характеристикой инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП является наличие специальных компетенций.

Развитие инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП должно быть направлено на решение стратегических задач по созданию перспективных образцов РКТ и выпуску высокотехнологичной продукции гражданского назначения, обеспечивать конкурентоспособность предприятия и его адаптацию к неопределенным, изменяющимся условиям внешней среды.

Концептуальный подход к управлению развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП. В данном исследовании предложен концептуальный подход к управлению развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП, сущность которого заключается в выявлении потребности в наращивании инновационного потенциала по каждому элементу (уровень компетенций, исследования и разработки, технологический уровень, кадры, система управления); разработке программы развития, предусматривающей конкретные мероприятия, увязанные по срокам и объемам работ; совершенствовании организационной структуры производства и управления под новые задачи; проведении мониторинга реализации программы.

По своей сути концептуальный подход предназначен для выработки единого определяющего замысла формирования и развития инновационного потенциала, который подразумевает установление требований, реализующихся посредством соблюдения соответствующих принципов.



Этапы процесса управления развитием инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП

Проведенный анализ основных положений современного инновационного менеджмента [10–13], составляющих инновационного потенциала, представленных в работе [8], а также связей между ними [14], позволил выделить частные принципы формирования системы управления развитием инновационного потенциала:

– принцип диффузии, который предусматривает переток идей и разработок из военного в гражданское производство в процессе развития инновационного потенциала;

– принцип воспроизводимости инновационного потенциала на основе коммерциализации, который заключается в учете характера зависимости между затратами на его развитие и величиной прироста в последующий период;

– принцип окупаемости инновационного потенциала, который характеризует достаточность прибыли, получаемой от реализации гражданской продукции и выполнения государственного заказа, на покрытие затрат, связанных с наращиванием инновационного потенциала для будущих потребностей государства и рынка;

– принцип опережения, который предусматривает наличие перспективных исследований и разработок, необходимых для будущих потребностей государства и рынка, основанных на общемировых тенденциях развития;

– принцип устойчивости, который характеризует процесс систематического и непрерывного выявления, оценки, формирования и использования инновационного потенциала наукоемкого предприятия, учитывающий специфику деятельности РКП и обеспечивающий его эффективное развитие.

Опираясь на выделенные принципы, к ключевым задачам управления развитием инновационного потенциала можно отнести следующие: 1) планирование необходимого инновационного потенциала с учетом воздействия факторов, влияющих на инновационное развитие наукоемких предприятий, представленных в работе [15]; 2) обеспечение прироста составляющих инновационного потенциала за счет доступных внешних и внутренних ресурсов; 3) реализация инновационного потенциала в виде конечного продукта – наукоемкой продукции, новой технологии, получение новых знаний для формирования научно-технического задела.

Опираясь на методологию использования метода дерева целей [16], процесс решения задач управления развитием инновационного потенциала РКП предлагается разбить на шесть последовательных этапов, результаты реализации которых будут учитываться в программе инновационного развития предприятия. Этапы управления развитием инновационного потенциала представлены на рисунке.

К особенностям процесса разработки и внедрения предложенного концептуального подхода к управлению развитием инновационного потенциала на предприятии РКП следует отнести следующие:

1. Система управления развитием инновационного потенциала должна опираться на основополагающие принципы системного подхода и включать в себя механизм создания отдельных преобразований во всех сферах деятельности наукоемкого предприятия.

2. Для эффективного развития инновационного потенциала наукоемкого предприятия (НП) РКП необходимо создать организационную структуру, состоящую из специалистов, имеющих соответствующую высокопрофессиональную подготовку и отвечающих за эффективность реализации разработанных мероприятий.

3. Оценка эффективности воспроизводства инновационного потенциала (ИП) должна осуществляться по результатам реализации основных направлений деятельности наукоемкого предприятия РКП: выпуск продукции военного и гражданского назначения.

4. При реализации программы развития инновационного потенциала на наукоемком предприятии принципиально важным становится создание системы постоянного мониторинга инновационного потенциала предприятия.

5. Формирование ключевых компетенций, на которых базируется развитие инновационного потенциала, необходимо систематизировать в виде внутренних стандартов для наукоемкого предприятия при выработке и принятии управленческих решений.

Заключение. Подводя итог проведенному исследованию, стоит отметить, что один из перспективных путей обеспечения конкурентного развития наукоемкого предприятия – организация эффективной системы повышения инновационного потенциала. Автор выражает надежду, что применение предложенного концептуального подхода к развитию инновационного потенциала наукоемкого предприятия РКП на практике позволит повысить эффективность программ инновационного развития, получить экономический эффект от внедрения предложенных инструментов, что в свою очередь позволит укрепить позиции организации на конкурентном рынке.

Библиографические ссылки

1. О Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2020 года (с изменениями и дополнениями) : распоряжение Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р. [Электронный ресурс]. URL: http://www. consultant.ru (дата обращения: 12.12.2014).

2. Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 08 декабря 2011 г. № 2227-р. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 12.12.2014).

3. Руководство Осло. Организация экономического сотрудничества и развития [Электронный ресурс] // Статистическое бюро европейских сообществ: рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям : пер. с англ. 2-е изд. испр. М. : ЦИСН, 2010. URL: http://www.mgimo.ru/files2/ (дата обращения: 16.04.2015).

4. Космическая деятельность России на 2013–2020 годы : Государственная программа Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://www. federalspace.ru/ (дата обращения: 23.01.2013).

5. Портал машиностроения : утверждение госпрограммы по развитию космической отрасли [Электронный ресурс]. URL: http://www.mashportal.ru/ (дата обращения: 23.01.2013).

6. Office of Commercial Space Transportation [Электронный ресурс]. URL: https://www.faa.gov/about/ office_org/ (дата обращения: 15.08.2014).

7. Spacenews [Электронный ресурс]. URL: http://spacenews.com/ (дата обращения: 06.03.2015).

8. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Инновационный потенциал наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности и его оценка // Фундаментальные исследования. 2014. № 12, ч. 11. С. 2398–2402.

9. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Понятие и сущность инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности // Теория и практика общественного развития. 2013. № 11. С. 216–219.

10. Инновационный менеджмент : учебник для вузов / А. Е. Абрамешин [и др.] ; под ред. д-ра экон. наук, проф. О. П. Молчановой. М. : Вита-Пресс, 2001. 272 с.

11. Менеджмент процессов : пер. с нем. / под ред. Й. Беккера [и др.]. М. : Эксмо, 2007. 384 с.

12. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента: пер. с англ. М. : Вильямс, 2009. 672 с.

13. Таллиннская школа менеджеров [Электронный ресурс]. URL: http://www.tarasov.ru/ about/tarasov (дата обращения: 10.12.2014).

14. Еремеев Д. В. Концептуальная модель взаимосвязи конкурентоспособности наукоемкого предприятия и его инновационного потенциала // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2013. № 3. С. 101–106.

15. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Научно-технологические факторы инновационного развития наукоемких предприятий РКП // Проблемы и перспективы социально-экономического реформирования современного государства и общества : материалы Междунар. науч.-практ. дистанционной конф. (2013, г. Москва). С. 16–20.

16. Репин В., Елиферов В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. 544 с.

References

1. RF Government Edict “About the concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation in the period up to 2020” of November 17, 2008, no. 1662-p (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru (accessed 12.12.2014).

2. RF Government Edict “About approval of the Strategy of innovative development of the Russian Federation in the period up to 2020” of December 8, 2011, no. 2227-p (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru (accessed 12.12.2014).

3. *Rukovodstvo Oslo. Organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya. Statisticheskoe byuro evropeyskikh soobshchestv: rekomendatsii po sboru i analizu dannykh po innovatsiyam* [Oslo Manual: Guidelines for collecting and interpreting innovation data]. Moscow, TsISN Publ., 2010. Available at: http://www.mgimo.ru/files2/ (accessed 16.04.2015).

4. *Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii “Kosmicheskaya deyatel'nost' Rossii na 2013–2020 gody”* [State Program of Russian Federation “Russian Space Activity in 2013–2020]. Available at: http://www.federalspace.ru (accessed 23.01.2013).

5. *Portal mashinostroeniya: utverzhdenie gosprogrammy po razvitiyu kosmicheskoy otrasli.* [Portal of engineering industry: approval state programmes about the development of the space industry]. Available at: http://www.mashportal.ru/ (accessed 23.01.2013).

6. Office of Commercial Space Transportation. Available at: https://www.faa.gov/about/office_org/ (accessed 15.08.2014).

7. Spacenews. Available at: http://spacenews.com/ (accessed 06.03.2015).

8. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. [Innovative potential of high technology enterprise space industry and its evaluation]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014, Vol. 12 (11), P. 2398–2402 (In Russ.).

9. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. [The concept and essence of innovative potential of high technology enterprise space industry]. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya.* 2013, Vol. 11, P. 216–219 (In Russ.).

10. Abrameshin A. E., Voronina T. P., Molchanova O. P., Tikhonova E. A., Shlenov Yu. V. *Innovatsionnyy menedzhment*. [Innovative management]. Moscow, Vita-Press Publ., 2001, 127 p.

11. Bekker Y., Vilkov L., Taratukhin V., Kugeler M., Rozemann M. *Menedzhment protsessov.* [Management processes]. Moscow, Eksmo Publ., 2007, 384 p.

12. Meskon M., Al'bert M., Khedouri F. *Osnovy menedzhmenta.* [Fundamentals of Management]. Moscow, Williams Publ., 2009, 672 p.

13. *Tallinnskaya shkola menedzherov*. [Tallinn School of managers]. Available at: http://www.tarasov.ru/about/tarasov (accessed 10.12.2014).

14. Eremeev D. V. [Conceptual model of competitiveness relationship of high technology enterprise and its innovative facilities]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*. 2013, Vol. 3, P. 101–106 (In Russ.).

15. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. [Scientific and technological factors of innovative development of high-tech enterprises of the RCP]. *Problemy i perspektivy sotsial'no-ekonomicheskogo reformirovaniya sovremennogo gosudarstva i obshchestva. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy distantsionnoy konferentsii* [The problems and perspectives of socio-economic reformation of modern state: materials of a theoretical and practical remote conference]. Moscow, 2013, P. 16–20 (In Russ.).

16. Repin V. V., Eliferov V. G. *Protsessnyy podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protsessov* [Process approach to management. Business Process Modeling]. Moscow, Mann, Ivanov i Ferber Publ., 2013, 544 p.

© Еремеева С. В., 2015

UDC 330.108

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 509–514

THE SYSTEM OF MANAGEMENT OF PERSONNEL'S INNOVATIVE POTENTIAL AT A HIGH TECHNOLOGY ENTERPRISE

E. V. Onisiforova

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: kath.gasenko@ya.ru

Formation of a new economic space and increasing globalization provides new challenges and prospects for organizations, which are based on innovation. In the innovative economy competitiveness of enterprises is greatly influenced by the development of scientific knowledge and new technologies, both in production and in the field of management. Thus, a problem of work with innovation, creation and development of a well-functioning innovative environment and the mechanism of its maintenance arises.

The solution of this problem mainly depends on the human factor, in particular, personnel's innovative potential. Today management should focus on a person and his or her innovative potential as a main source of innovation and factors that contribute to a high level of innovative activity of enterprises.

The paper analyzes the features of labour at high-technology enterprises, two categories of employees are distinguished, that is employees involved in direct production and employees involved in innovative activity. On the basis of these, we propose the system of management of personnel's innovative potential, consisting of the following elements: objectives, tasks, functions, subjects of management, organizational forms, means, methods, techniques, motivation, assessment, development.

The obtained results of the study are aimed at solving the strategic and tactical problems in the implementation of the strategy of innovative development of a high-technology enterprise with the help of the formation of an effective system of management of personnel's innovative potential at an enterprise.

Keywords: personnel management, personnel's innovative potential, innovative economy, high technology enterprise.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 509–514

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЕРСОНАЛА НА НАУКОЕМКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Е. В. Онисифорова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kath.gasenko@ya.ru

Формирование нового экономического пространства и усиление тенденции глобализации ставят перед организациями новые задачи и перспективы развития, в основе которых лежат инновации. В условиях инновационной экономики необходимым условием конкурентоспособности предприятия является развитие научных знаний и новых технологий как в сфере производства, так и в сфере управления. Таким образом, встает проблема осуществления инноваций, создания и развития эффективно функционирующей инновационной среды и механизма ее обеспечения.

Решение этой проблемы в значительной мере обусловлено человеческим фактором и, в частности, инновационным потенциалом персонала. Сегодня особая роль должна отводиться человеку и его инновационному потенциалу как главному источнику инноваций и фактору, обусловливающему высокий уровень инновационной активности предприятия.

Проанализированы особенности труда на наукоемких предприятиях, выделены две категории сотрудников – сотрудники, занимающиеся непосредственно производством, и новаторские кадры. На основе этого предложена система управления инновационным потенциалом персонала, состоящая из следующих элементов: цель, задачи, функции, субъекты управления, организационные формы, средства, методы, технологии, мотивация, оценка, развитие.

Результаты исследования направлены на решение стратегических и тактических задач в рамках осуществления стратегии инновационного развития наукоемкого предприятия за счет формирования эффективной системы управления инновационным потенциалом персонала предприятия.

Ключевые слова: управление персоналом, инновационный потенциал персонала, инновационная экономика, наукоемкое предприятие.

Introduction. In today's modernised economy, the activity of employees is a leading factor determining the basis for the development of innovative ideas and their successful implementation at high-technology enterprises. The most progressive and dynamic enterprises of Russian industry are enterprises of the aerospace industry, because features of their functioning, the tendency of constant obsolescence of their products, constant need for upgrading technology determine the requirement for continuous development and implementation of innovative developments.

Setting the aim. Thus, employees of enterprises must be able to perceive and implement innovations in the workplace, as well as produce innovations. Therefore, under these circumstances, management actions should focus on the development and use of personnel's innovative potential.

Peculiarities of high technology enterprises and their employees. The company's work on contemporary market must meet the requirements of modern economy:

– there is a high level of competition that is associated with deletion of economic borders on a national and global scale;

– accelerating scientific and technical progress requires constant consideration of modern achievements and compliance of products and services with the advancement in science and technology;

– development of communications infrastructure allows many businesses to have a physically atomized structure, and this fact must be taken into account in the competition;

– presence of an open information environment leads to the necessity of existence of effective defense against various threats to information: from theft of technology to dangers of using false information, threatening economic security of an enterprise;

– increase in the share of intellectual work, mechanical work is transmitted to machines and human labor becomes more creative, innovative, based on personal and professional potential [1].

High-technology industries are characterized by the fact that the major factor of production, and thus the most important resource in competition is knowledge of their employees [2]. Taking the special role of personnel in the activity of high-technology industries into consideration, it is necessary to mention the distinctive features and peculiarities of labour in these industries.

Labour of employees at high-technology enterprises has the following features:

– the labor process is creative, which leads to the importance of stimulating creative processes;

– the result of labour is immaterial, therefore there is a need for special approaches to accounting work performed by employees;

– the result can not be accurately predicted, so the assessment system of personnel must take this into account;

– assessment of employees' contribution to the development and manufacture of high-technology products requires special tools and techniques;

– control of creative processes provokes additional socio-psychological difficulties [3].

The nature of work and the peculiarities of high-technology industries make the following specific requirements for personnel of these enterprises:

– high skills, flexibility, and wish to learn in order to effectively participate in research and development, as well as for production activities due to regular updates and product complexity. High technical competence is required even for employees of marketing and sales departments for competent and effective knowledge-based activity in the field;

– in the information society employees should work much faster because the new environment requires an increase in the rate of supply of products and services, employees must be able to adapt to new conditions and act very quickly, using modern means of transmitting information;

– good communication skills are also required. If the organization is geographically dispersed, the importance of communication and personal meetings should still be considered for more productive work and strengthening the sense of belonging to team and working for a common goal;

– creative abilities (due to the necessity to take part in research and development) [1].

As a rule, personnel in scientific and technical spheres has (should have) special personal characteristics due to the nature of their activities. According to modern scholars, changes in the structure of needs is primarily characteristic of scientific and technical personnel: the growing importance of non-material needs and moving the scope of their satisfaction to the workplace. According to the classification of T. Stewart [4], the scientific and technical staff of high-technology industries are a group of workers with high-impact and labor substitutability, they are top-level professionals whose knowledge and ability provide a competitive advantage. They are the special value of the company.

In general, personnel of high-technology enterprises can be divided into two categories – employees involved in direct production (manufacturing and production of goods, quality control, etc.), and "innovative personnel, who are people influencing the success of the organization, its scientific maintenance and commercial development directly. Innovative personnel may include scientists, generating ideas; managers, defining the most effective innovations and organizing the process of their implementation; skilled workers proposing projects for product improvement or improvement of technical processes" [5].

Due to the nature of high-technology industries, their personnel and the peculiarities of innovative activity, the decisions made in this field also have a number of specific features. We point out the main ones:

– decisions are difficult to standardize because the problems are unique;

– they destroy the economic balance, creating contradictions and uncertainty in the economic dynamics;

– decisions often provoke resistance;

– they are associated with higher costs of resources;

– they require knowledge of the latest advancement in science and technology [3].

Personnel management at a high-technology enterprise. Personnel management of high-technology enterprises should correspond to and line up with the features of today's market, the specific features of such enterprises and personnel activity within the high-technology industry.

In national literature there is no consensus on the definition of personnel management, but there are several approaches:

1. Institutional approach. From the standpoint of this approach, personnel management is considered to be “various activities of different actors (among which there is a system of personnel management, linear and senior executives performing the function of management in relation to their subordinates), aimed at realizing objectives of strategic development of the organization and execution of tactical tasks on the most efficient use of employees of the organization” [6].

2. Informative (functional) approach. This approach is based on the allocation of functions of personnel management, its objectives and tasks of functioning in an organization, it shows “what actions, processes must be implemented in order to achieve these objectives”, as opposed to the institutional approach, which focuses on “what personnel management should do for the organization. This allows to perceive personnel management as a special type of activity, a whole system, which has its own specific content” [6].

3. Organizational approach. In terms of this approach, personnel management can be defined as ”a set of interrelated economic, organizational and socio-psychological methods to ensure the effectiveness of employment and the competitiveness of enterprises. In this case interaction of an object and a subject, mechanisms, technologies, tools and procedures for the implementation of personnel management functions are described” [6].

4. The approach viewing the process of purposeful interaction and mutual influence of managers and staff in the joint productive activity as an object of personnel management system. This approach defines a system of management as the unity of subject and object of management, which is achieved as a result of self-regulation in complex social systems and also of the purposeful impact of the object of management on the subject. In this case, the object of management involves social relationships, processes, groups, social resources and a man himself, who inevitably enters social relationships, is involved in social processes and groups, use of resources [7].

Hence, personnel management can be considered as a system that has an object and a subject of management, between which there are organizational and managerial relationships, as well as management functions, which are realized through certain methods. The system of personnel management is built on the basis of a particular concept. The concept of personnel management includes the basic principles of management and its general directional thrust, its regulations are unique in an organization, but, nevertheless, the contents of personnel management includes elements that are common. Thus, the contents of personnel management includes:

a) determining the need for personnel based on the development strategy of an enterprise;

b) formation of quantitative and qualitative composition of personnel (recruitment, selection and placement of personnel);

c) personnel policies (principles of selection and placement of personnel, conditions of employment and dismissal, training and professional development, assessment of personnel and its activities);

d) a system of general and vocational training;

e) adaptation of employees at an enterprise;

f) remuneration and stimulation (forms of remuneration, ways of improvement of labour productivity, etc.);

g) assessment and certification of personnel;

h) system of personnel development (training, career planning, etc.);

i) formation of personnel reserve;

j) organizational culture of the company, as well as interpersonal relationships between employees, management and non-governmental organizations [8–10].

In conditions of economy based on knowledge and innovations, the content of each of the above mentioned components of personnel management acquires new features. In the traditional approach to personnel management the required amount of work related to personnel recruitment is largely determined by the difference between the existing workforce and future demand for it. In innovative activity, which is characterized by uncertainty and significant risks, it is almost impossible to predict future demand in the labour force. Also work in an innovative organization imposes additional requirements for potential employees. In addition to traditional qualities (theoretical knowledge, experience, hard work, health, etc.) it is necessary to possess flexibility and mobility of thought, creativity, the need for self-actualization, the ability to adapt to rapidly changing working conditions, ability for learning and retraining [11]. Accordingly, there occur changes in the content of personnel policy, rebuilding the system of personnel assessment and system of its development.

On the whole, the following features of personnel management in terms of innovation can be distinguished:

– complexity, novelty, and uniqueness of work performed by personnel;

– high qualification, personal and psychological assessment of the quality of personnel;

– high turnover of personnel;

– possibility of a getting high wages by personnel;

– possibility of realizing the needs of personnel in self-expression;

– strong motivation system;

– new role of administrative personnel of an enterprise [12];

– new forms of cooperation between workers and professional teams (formation of project teams and innovative teams to solve a particular problem);

– formation of personnel reserve considering the new competencies of personnel needed to implement innovations.

Thus, functioning of an enterprise in the innovative economy, formation of an innovative strategy at an enterprise implies presence of resources and potential for its implementation, therefore, the fundamental factor for the development of an enterprise is its innovative potential and innovative potential of its employees, who also become an object of management.

System of management of personnel's innovative potential. According to K. A. Lega, management of personnel's innovative potential is a continuous, dynamic process constantly and consciously carried out by all participants, which involves carrying out various procedures, activities and operations aimed at changing the level of innovativeness of personnel. Innovativeness is susceptibility, willingness and ability to innovate; an ability to rapidly assimilate and use scientific and technological achievements; forecasting new trends in the development of science and technology and responsiveness to changes in the external environment; readiness of personnel for the effective development of scientific and technological innovations, creating the necessary objective socio-economic conditions for the introduction of innovations from the standpoint of human factors [12].

To improve the use of personnel's innovative potential it is necessary to form a system of management of personnel's innovative potential, which allows to systematize processes and forms of influence on personnel of an enterprise and provide the necessary level of its development.

A number of researchers have proposed different types of systems of management of personnel's innovative potential [12–14]. Based on the analysis of their findings, we propose the structure of the system shown in picture.

In our research, the objective of managing personnel's innovative potential is defined as provision of an optimal level of development of personnel's innovative potential for innovative activity of an enterprise and increasing its competitive advantages in the innovative economy.

The tasks of management of personnel's innovative potential, in our opinion, are:

– formation, development and maintenance of knowledge and skills of employees necessary for innovative activity;

– assessment of personnel's innovative potential in order to identify problem areas of its development;

– providing the necessary managerial impact on the factors affecting the level of development of personnel's innovative potential;

– accumulation, systematization and transfer of new knowledge and technologies;

– maintaining "innovative spirit" at an enterprise;

– improving compliance of employee's values with corporate values;

– improving personal and professional qualities of company's employees.

V. P. Gorshenin highlights 7 functions of the system of management of personnel's innovative potential in his study:

1) compensatory, which restores previously missing or lost educational opportunities;

2) adapting, which implies adaptation to new professional requirements in the rapidly changing society;

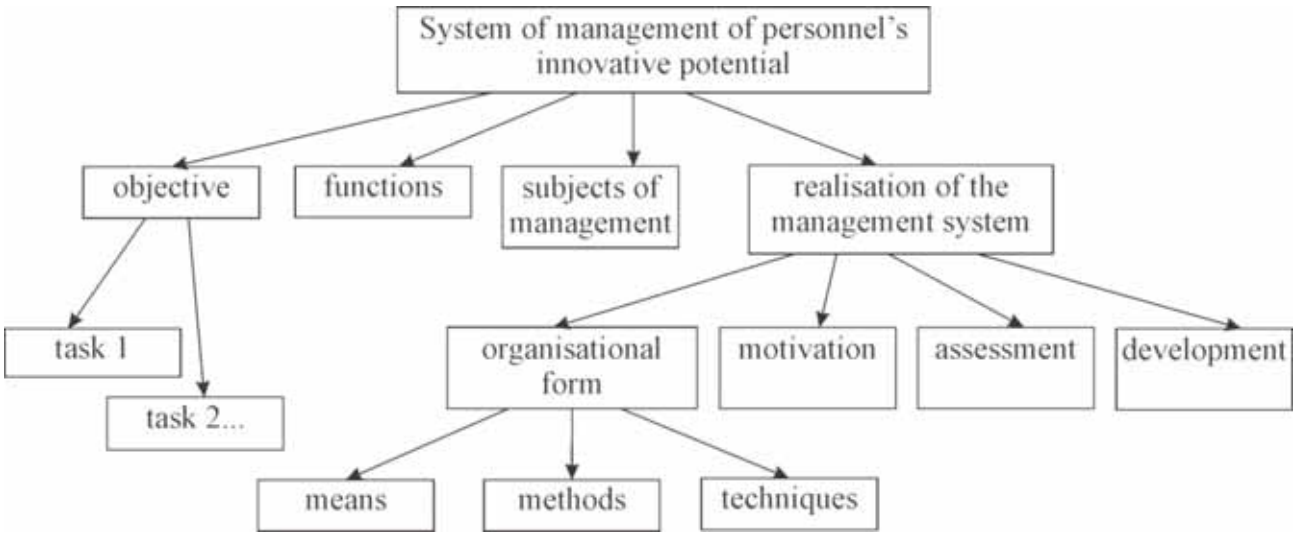
3) developing, that means progressive enrichment of active personal abilities and spiritual world;

4) correcting the change of patterns of thinking and behavior, overcoming personal professional deformations;

5) forming, which involves acquisition of new knowledge and skills in connection with the expansion or transformation of functional responsibilities;

6) assisting, which implies consulting services in the event of stubborn problems;

7) matching, that means integration of personal value system of employees with organizational values and culture [13].



The system of management of personnel's innovative potential

In our study we also propose a motivating function (the eighth), which is to provide stimulating support of personnel's innovative activity. An enterprise should have mechanisms for the formation of employees' motivation to innovate, to acquire new knowledge and skills, to create innovative products. The motivating function can be realized by identifying employees' needs, expectations and motives for carrying out activities desired by the organization and ultimately leading to the required results, on the basis of which, there is a need for the formation of motivating factors that may encourage employees to realize their innovative potential.

The subjects of management of personnel's innovative potential involve both employees of an enterprise and its management team.

Implementation of the system of management of personnel's innovative potential is carried out using any of organizational forms of management. An innovative resource center is used for this purpose in some modern organizations. This is a center for searching, processing, structuring and storing information about existing developments in the area of interest, as well as for strategic planning of future activities and training on the basis of available data. The innovative nature of knowledge and skills obtained through the innovative resource center is achieved by combining research and training components of activity at an enterprise.

Within the organizational forms of managing personnel's innovative potential a variety of methods, techniques and tools is used. Traditional methods involve discussions, seminars, trainings, conferences, self-education. Also it includes innovative teaching methods such as the method of case studies, brainstorming, action learning method, role modeling and simulation games, project-based learning, and others [13].

Technology of managing personnel's innovative potential as a complex of organizational measures should be aimed at efficient and orderly accumulation, systematization, transfer and use of new knowledge by employees of the enterprise. The means ensuring the flow of these processes should involve technical means used for searching and storage of data, including telecommunications equipment required mainly for sharing information. Also the necessary means of management and development of personnel's innovative potential are educational-methodical complexes, educational programs, which are primarily focused on solving problem tasks, creative approach and contribute to the development of intelligence, flexibility of thinking and innovative potential.

An integral part of the system of management of personnel's innovative potential and its implementation is personnel's motivation to participate in self-development and innovative activity. Tangible and intangible motivation tools should be used depending on the values and orientations of each employee, and motivational impact should be aimed at developing desire for development, improvement in the professional field and creative solutions.

Assessment and development of personnel's innovative potential in the structure of the management system are mutually reinforcing elements, as conclusions about the level of development of personnel's innovative potential and quality of management drawn on the basis of assessment make it possible to decide on the need for training and to minimize barriers associated with the development of personnel's innovative potential hindering the effective use of it.

Conclusion. In summary, it must be concluded that management of personnel's innovative potential plays an important role in the system of personnel management at high-technology enterprises, as knowledge, skills and innovative activity of employees of high-technology enterprises provide its competitive advantage, are of particular value to it and are the most important factor determining its development. There should be a system of management of personnel's innovative potential, which aims at providing the optimal level of development of personnel's innovative potential to implement innovations at an enterprise and increase its competitive advantages in the innovative economy.

References

1. Timofeev I. P. *Upravlenie trudovoy aktivnostyu personala naukoemkikh predpriyatiy. Dis. cand. ekon. nauk.* [Management of personnel's labour activity at high technology enterprises. Cand. econ. sci. diss.]. Moscow, Zelenograd, 2007, 155 p.

2. Gmyur M. [Managerial staff at high technology enterprises], *Problemy teorii I praktiki upravleniya*, 2004, No. 1 (In Russ.). Available at: http://vasilievaa.narod.ru/ptpu/12_1_04.htm. (accessed 30.10.2014).

3. Lukichyova L. I., Egorychev D. N. *Upravlencheskie resheniya* [Managerial decisions], Moscow, Omega-L Publ., 2006, 383 p.

4. Stewart T. A. *Intellectual Capital. The New Wealth of Organizations.* N. Y.-L., Doubleday, Currency, 1997, p. 67.

5. Filina F. N. [Managing innovations in HR]. *Rossiiskiy bukhgalter*, 2007. Available at: http://www.rosbuh.ru/article.asp?rba_id=918&rbac_id=2513#chp (accessed 30.10.2014).

6. Drofa V. V., Polovinko V. S. *Upravlenie personalom nauchno-proizvodstvennykh organizatsii* [Personnel management in research-and-production organisations]. Moscow, Inform-Znanie Publ.; Omsk, Nasledie. Dialog-Sibir Publ., 2001, 208 p. (In Russ.).

7. Ovchinnikova T. [New paradigm of personnel management in transitional economy]. *Upravlenie personalom*. 2001, No 7, P. 34–39 (In Russ.).

8. Bychin V. B. *Personal v upravlenii radikalnymi novovvedeniyami v organizatsii* [Personnel in managing radical innovations in an organisation]. Moscow, Inform-Znanie Publ., 1999, 400 p.

9. Rogers E. M., Shoemaker F. F. *Communication of innovation*. New York, Free Press Publ., 1970, p.19.

10. Thompson V. *Bureaucracy and innovation*. Adininistr. Sci. Quail. Publ., 1965, P. 2.

11. Gunin V. N., Barancheev V. P., Ustinov V. A., Lyapina S. Yu. *Upravlenie innovatsiyami: 17-modulnaya programma dlya menedzherov "Upravlenie razvitiem*

organizatsii”, Modul 7. [Innovation management: 17-modular program for managers “Management of organizational development”]. Moscow, Unity Publ., 2003, 328 p. (In Russ.).

12. Lega K. A. *Formirovanie mekhanizma upravleniya innovatsionnym potentsialom personala korporatsii. Dis. cand. ekon. nauk.* [Formation of mechanism for managing personnel’s innovative potential in a corporation. Cand. econ. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2008, 194 p.

13. Gorshenin V. P. [System of development of personnel’s innovative potential]. *Kadrovik. Kadrovy menedzhment*. 2007, No. 2, P. 42–47 (In Russ.).

14. Khadasevich N. R. *Formirovanie innovatsionnogo potentsiala organizatsii. Dis. cand. ekon. nauk.* [Formation of personnel’s innovative potential in an organization. Cand. econ. sci. diss.]. Surgut, 2008, 179 p.

Библиографические ссылки

1. Тимофеев И. П. Управление трудовой активностью персонала наукоемких предприятий : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 [Место защиты : Моск. гос. ин-т электр. техники]. М. : Зеленоград, 2007, 155 с.

2. Гмюр М., Климецки Р. Г., Литц Ш. А. Набор руководящих кадров на наукоемких предприятиях [Электронный ресурс] // Проблемы теории и практики управления : Междунар. журнал. 2004. № 1. URL: http://vasilievaa.narod.ru/ptpu/12_1_04.htm (дата обращения: 30.10.2014).

3. Лукичева Л. И., Егорычев Д. Н. Управленческие решения : учебник по специальности «Менеджмент организации» / под ред. Ю. П. Анискина. М. : Омега-Л, 2006. 383 с.

4. Stewart T. A. Intellectual Capital. The New Wealth of Organizations. N.Y.-L. : Doubleday, Currency, 1997. P. 67.

5. Филина Ф. Н. Управление нововведениями в HR [Электронный ресурс] // Российский бухгалтер. 2007. URL: http://www.rosbuh.ru/article.asp?rba_id=918&rbac_id=2513#chp (дата обращения: 30.10.2014).

6. Дрофа В. В., Половинко В. С. Управление персоналом научно-производственных организаций. М. : Информ-Знание ; Омск : Наследие. Диалог-Сибирь, 2001. 208 с.

7. Овчинникова Т. Новая парадигма управления персоналом в условиях переходной экономики // Управление персоналом. 2001. № 7. С. 34–39.

8. Бычин В. Б. Персонал в управлении радикальными нововведениями в организации. М. : Информ-Знание, 1999. 400 с.

9. Rogers E. M., Shoemaker F. F. Communication of innovation. New York : Free Press Publ., 1970. P. 19.

10. Thompson V. Bureaucracy and innovation. Adininistr. Sci. Quail. Publ., 1965. P. 2.

11. Управление инновациями: 17-модульная программа для менеджеров «Управление развитием организации». Модуль 7 / В. Н. Гунин [и др.]. М. : Юнити, 2003. 328 с.

12. Лега К. А. Формирование механизма управления инновационным потенциалом персонала корпорации : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 [Место защиты : Юж.-Ур. гос. ун-т]. Челябинск, 2008. 194 с. : ил.

13. Горшенин В. П. Система развития инновационного потенциала персонала // Кадровик. Кадровый менеджмент. 2007. № 2. С. 42–47.

14. Хадасевич Н. Р. Формирование инновационного потенциала персонала организации : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 [Место защиты : Всерос. центр уровня жизни]. Сургут, 2008, 179 с. : ил.

© Onisiforova E. V., 2015

UDC 65.012.4

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 515–522

INNOVATIVE REGIONAL DEVELOPMENT: NEEDS FOR DIVERSIFIED ECONOMIC GROWTH OF SIBERIA UNDER THE CONDITIONS OF REINDUSTRIALIZATION

E. V. Sumina[1*], D. V. Zyablikov[2]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., 660041, Krasnoyarsk, Russian Federation
[*]E-mail: Sumina@sibsau.ru

The article investigates the essence and the priority of economy reindustrialization in Siberia taking into accounts the needs and characteristics of the innovation development of raw materials regions. The issue of developing the theoretical approaches to the formation of innovative regional development strategy is in the foreground, taking into account technological modernization priorities in Siberia. The aim of the given work is to determine the role of the rocket and space industry in the sectoral structure of Siberian regions as an essential component of the military-industrial complex (MIC) that is traditionally prioritized and has the potential for industrial growth to diversify the economy. We have analyzed the major milestones, the role and the problems of the defense industry in the USSR and the situation in modern Russia. Moreover, we have defined the role of the rocket and space industry in the MIC structure and engineering in the domestic economy, highlighted problems and development targets. Methodological basis of research and preparation of this work involves the fundamental researches of Russian and foreign scientists in the field of regional economy, innovation development and economic theory. The article gives the analysis of the reindustrialization experience in Japan and in other countries. It presents the definition of innovative development and innovation in the context of the key role of technological core of the regional systems development. Besides, the work describes the essence and direction of the economy diversification in the reindustrialization process of Siberia and a number of important aspects and problems of smoothing intraregional social and economic differences with diversification opportunities. The article presents the investment indices in technological innovation and modernization initiatives in major industries of Krasnoyarsk region, as well as the comparative evaluation with other regions of the Siberian Federal District (SFD). The analysis defines the role of the defense industry sectors in the innovative economy development of Siberia and their influence on the processes of new industrialization in other branches. In addition our task was to determine the priorities and challenges of innovative development and the economy diversification in Siberia, the main directions of the administration activities. That allows to solve the problems of regional innovative development and the industry modernization.

Keywords: innovative development, reindustrialization, regional economy diversification, the military-industrial complex (MIC).

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 515–522

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНА: ПОТРЕБНОСТИ ДИВЕРСИФИЦИРОВАННОГО РОСТА ЭКОНОМИКИ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ РЕИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ

Е. В. Сумина[1*], Д. В. Зябликов[2]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[*]E-mail: Sumina@sibsau.ru

Исследована сущность, приоритеты реиндустриализации экономики Сибири с учетом потребностей и особенностей инновационного развития регионов сырьевой направленности. Актуализируется вопрос о развитии теоретических подходов к формированию стратегии инновационного развития региона с учетом модернизационных технологических приоритетов Сибири. Целью данной работы является также определение роли ракетно-космической отрасли в отраслевой структуре сибирских регионов как важнейшей составляющей оборонно-промышленного комплекса (ОПК) – традиционно приоритетного и имеющего потенциал

промышленного роста направления диверсификации экономики. Проанализированы основные вехи, роль и проблемы развития ОПК в СССР и состояние в современной России. Определена роль ракетно-космической отрасли в структуре ОПК и машиностроения в отечественной экономике, выделены проблемы и целевые ориентиры развития. Методологическая основа исследования и подготовки данной работы включает фундаментальные исследования российских и зарубежных ученых в области региональной экономики, инновационного развития, экономической теории. Проанализирован опыт реиндустриализации Японии и других стран. Представлено определение инновационного развития и инновационного потенциала в контексте ключевой роли технологического ядра развития региональных систем. Раскрыта сущность и направления диверсификации экономики Сибири в процессе реиндустриализации. Рассматривается ряд важнейших аспектов и проблемы сглаживания внутрирегиональных социально-экономических различий с использованием возможностей диверсификации. Представлены показатели инвестиций в технологические инновации и модернизационные инициативы по основным отраслям Красноярского края, дана сравнительная оценка с другими регионами Сибирского федерального округа (СФО). В результате анализа определена роль отраслей ОПК в инновационном развитии экономики Сибири, влияние на процессы новой индустриализаии в других отраслях. Определены приоритеты и проблемы инновационного развития и диверсификации экономики Сибири; основные направления деятельности администрации, позволяющие решить задачи инновационного развития региона, модернизации промышленности.

Ключевые слова: инновационное развитие, реиндустриализация, диверсификация экономики региона, оборонно-промышленный комплекс (ОПК).

Introduction. The formation of an innovative component of the economy that meets the objective requirements of introducing the scientific achievements into production, as well as modern challenges of complex international economic and political environment, has defined the need to find methodological and theoretical approaches and tools of the new industrialization of the Russian economy. The political leadership of the country, our economic authorities have designated reindustrialization of Russia as the basic trend of its economy modernization. That is a new stage of industrial development and industrial policy based on the latest technological order. The main goal of reindustrialization is the restoration of the role and place of the industry in the national economy as its basic component, as well as its diversified growth through the high-tech industries development. In the Academician E. M. Primakov's opinion: "The main features of the new industrialization are the diversification of the economy structure due to the growth of manufacturing industry share; ensuring this process with properly qualified labor supplies; financial system modernization to the needs of reindustrialization; the development of "channels" or "elevators" linking scientific potential of industry with production; systems import of high-technologies ..." [1]. Reindustrialization is becoming a priority trend in connection with the political crisis and the sanctions limiting the Russian economy. The given economical processes are necessary to ensure domestic production; it is the condition for the industrial economy development in response to the received impetus and forced departure of foreign competitors. New reindustrialization is relevant in deciding the matter of significant intraregional and interregional differentiation, as well as improving people's life quality including unurbanizied territories and the ones having mainly raw material production. Reindustrialization is designed to enable the existing potential for industrial growth and development in a number of traditional prioritized industries for Russia and Siberia.

Innovative region development. The purpose of regional innovation policy are regional economic stabilization and growth, the achievement of the conditions for effective execution and rational use of the budget at the expense of conserving and developing scientific and technological capacity and creating favorable conditions for innovative activity. Innovative development places the region to a qualitatively new level of social and economic position, changes in life quality indices, the formation of the innovation system. Any innovative development is not only a major innovation process but also the development of the factors and conditions system necessary for its implementation, i. e. innovation potential. In this regard, by innovative potential we mean regional opportunities for creation, development, introduction and distribution of useful innovations (new knowledge, ideas, technologies, products, services, management practices, processes, social and cultural patterns, etc.) [2]. Under the conditions of globalization and international competition, innovative way of Russian economy development has in fact no alternative. The relevance of regional innovative development is motivated not only by external challenges, but also internal problems. The continuing high level of differentiation of social and economic development in the Russian Federation entities leads to annual losses of 2–3 % of GDP. Furthermore, these are innovation activity and innovation sensibility of regional economies and industries on which strategic competitiveness of Russia in the global economy depends.

Innovative development of the region is initiated by a qualitative upgrading and the identification of the factors that stimulate technological development and reequipment. In this context, reindustrialization is a condition for the region innovation development. The significant structural changes in the economy, "technological advances", are required, that ones that Joseph Schumpeter called "creative destruction".

The military-industrial complex (MIC): the role in the economy of Russia, the state and reindustrialization prospects. Military-industrial complex (MIC) has been an essential component of the Russian economy model for about 300 years. In Soviet

times, the costs on MIC accounted for 8 % of GDP according to official figures, over 15–20 % in fact, up to 25 % according to Western experts. For comparison, the costs of Japan were 1 %, Germany – 3 %, USA – 6 % [3]. The best level of costs is considered to be from 4–5 % of GDP. According to the estimation available, up to 13 % of GDP had been spent on the Soviet military-industrial complex by the end of 1980s, which provided 30 % of GDP for the period of the USSR collapse. World practice has shown that the normal adaptation rate of the military industry to the civilian one doesn't constitute more than 5–7 % per year. The pace of economically non-efficient conversion in Russia was several times higher. Military costs fell by 90 %. In 1998 production volume of MIC products was 19.2 % of the one in 1991, providing capacity utilization only for 10–15 % [4]. Military industry includes 9 industries, rocket and space production accounts for 60 % of total output. Lack of a tool to minimize costs later presented a contrast to the principles of creating the western economy in the1980s. The restructuring of the USA military sector in those years was focused on borrowing high-tech achievements of civil engineering in the production of military equipment. In the USSR, on the other hand, high-tech production didn't exist outside the military-industrial complex. These days, the reverse model of transition from extensive to intensive (innovative) development of the Russian economy is being implemented, in which MIC industries are the basis of technological development, diffusion of knowledge in the production of civilian goods. Rocket and space industry is a MIC priority and perspective. It plays a leading role in providing military and economic security, thus exerting significant influence on the level of military, economic, and scientific potential of Russia. In 2014, Russia kept the first place in the number of starts according to the information policy service of the Federal Space Agency (Roskosmos). Accordig to Deputy Prime Minister Dmitry Rogozin, relevant global challenges and problems are issued for the development of Russian space exploration. At the enterprises of this industry a loose technological discipline persists, sometimes criminal negligence happens. At the same time, there is no material and administrative responsibility of general executives in the industry. The reform of space industry is going on. The main industries of the Russian rocket and space complex are expected to be replaced from the central part of Russia to Eastern Siberia and the Far East after the establishing United Rocket and Space Corporation. Russian rocket and space industry has to double production capacity by 2020 compared to 2011, while the share of Russia in space technology world production should be increased from 10.7 % to 16 %. The State Program of space activities development up to 2020 published this statement on the website of Roskosmos. Searching for the growth factors of competitiveness, along with the task of diversified growth of the Russian economy are necessary.

Formation of innovative development strategy of Siberia with an allowance for the technological priorities, the experience of Japan and other countries. Taking into account technological modernization priorities Siberia, the development of theoretical approaches to the formation of the region innovative development strategy becomes an important issue for the space industry. 30 technology platforms are approved to be priority directions of scientific and technological development of Russian business by the resolution of the Government Commission on High Technology and Innovation [1]. On the territory of Siberia, in Krasnoyarsk region the technological platform "National Information Satellite System" will be placed. In accordance with the State Program "Industry Development and the Increase of its Competitiveness" approved as amended Decree of the Government of the Russian Federation in January 2013, a priority objective is the transformation in 2020 of "scientific and technical, as well as industrial and technological potential of MIC in efficient innovative resource supported by state by means of rapid technological modernization, implementation of its competitive advantages, and the development of human resources of military-industrial complex". A number of leading researchers have expressed the view that the economy of Russia has accelerated in 2014 despite the political crisis but further development is possible only at the beginning of real reforms that facilitate doing business. Reindustrialization actually includes the essential condition for the innovative component development of any economic system, i. e. technological innovations, and the business environment formation as an essential and necessary condition for innovative development. In modern approaches and programs of regional management and development the most important point is the regional competitive position and the formation of the national innovation system. These issues are interrelated and interdependent. Both classics and contemporary theorists A. Smith, D. Ricardo and D. S. Mill, M. Porter, S. Cohen, J. Sachs, A. Hart, A. I. Tatarkin, A. Z. Seleznev and other foreign and domestic authors determined the factors and the nature of regional competitive advantages, the increasing role of competition and cooperation in the regions for reasons of technological development to knowledge-intensive industries.

After the global crisis in 2008–2009 the economy of Russia had been mostly restored by 2012, with an average annual growth of GDP about 4 %. Then the growth rate began to decline and by the autumn of 2014, according to the Minister of Economic Development of the Russian Federation A. Ulyukayev, consumer price inflation was 8.1 %, economic growth was 0.8 %. In this case, there is the rise of industrial production in Russia in the second quarter of 2013. Development Center experts of HSE noted that the highest rates are in the manufacture of vehicles (airplanes, helicopters, ships, cars and so on.) purchased by the state and state-owned companies. This causes a revival in related industries (metal, plastics and components production). In the rest of the industry there is stagnation. From 1990 to 2008 about 70 thousand industrial enterprises were closed [5]. According to the theory of innovation cycles by I. Schumpeter and the new economic paradigm by S. Y. Glazyev world economic system is on the threshold of the sixth economic set-up. Innovations are the basis of economic development on a transitional stage, in connection with scientific and

technological progress there is a transition from lower to higher and progressive orders. These processes determine the key technologies and new requirements for training human resources. The industrialization of the USSR that took place in the thirties of the last century was also due to the transition to a new technological set-up, which allowed to form the productive forces according to the new demands of the global economy.

Some other examples of reindustrialization and the factors determining economic growth are noteworthy, e. g. the postwar economic reform in Japan (1950–1960s) and the phenomenon of “Japanese miracle”. Japan managed to catch up with other major industrialized countries in a short time by importing inventions and mastered technology and technological knowledge. By the end of the 40s the country had made significant progress in improving the skills of the workforce, developing the creative abilities of managers, which allowed to introduce and implement modern foreign technological advances without much difficulty and to put into practice their improvement on this basis, as shown by an example of the electronics industry. Over the next five years, all this led to a steady increase in labor productivity. Japan annually increased labor productivity by 9.9 % [6]. Currently, Russia embarked on the path that Japan had already passed by 2000 in terms of identifying development trends in the “information society”, the preparation and adoption of necessary information legislation, optimization of state administration with the use of information networks and the Internet (the program “Electronic Government”), as well as provision with the legal mechanism for citizens' access to information and protection of citizens' personal information, the transition to broadcasting in high definition, ensuring mobile services of third generation. The first steps to the development of its own missile technology were made in Japan in the early 50s in Research Institute of Industrial Technology at the University of Tokyo that had a special rocketry laboratory. 130 innovative trends are defined as the reference points to 2035. These are crucial technologies that affect the level of economy competitiveness and the solution of social and economic problems in Japan.

We should also mention the experience of industrial development and modernization of the economy of Korea, Singapore and the Chinese model in the 1980s and 1990s. The main objective of China's economic reform during this period was to ensure long-term sustainable economic growth based on the creation of new private enterprises and the involvement of the maximum possible contingent of economically active population by abandoning of total state ownership domination, attracting foreign investors in the Chinese market [7].

In contrast to the US experience with large resource potential the policies of universal coverage of all lines of innovative industrial development are realized. With all the variety of innovative development directions and limited resources there is a selective approach to the industry development and the introduction of advanced science technologies to most market segments. Sustainable competitive advantages are achieved in many high-tech industries. Back in the 70s in Japan the pattern of “computerized town” was introduced as the analogy of technology parks implemented today in Russia in the sphere of high technologies [6]. The development of Krasnoyarsk region within the priority of long-term objectives of regional development in Siberia involves interaction of regional public authorities, local government and business in solving prioritized long-term objectives. The latter are set out in the economic development strategy of Siberia: providing large-scale technological reequipment; radical modernization of vocational education to meet the requirements of innovative development in modern society; providing proactive development of transport, energy, construction and social infrastructure; developing the sector of natural raw materials in-depth processing; regional technological development giving the priority to ecologically clean production technologies; the formation of effective mechanisms for the promotion of innovative technologies in all sectors of the agribusiness industry and other “modernization” objectives. The most important aspect is to change the stereotypical thinking and to form a new entrepreneurial culture focused on the search for innovative ideas with high market potential and social effects for deciding the problems of the region.

Identifying the key factors of reindustrialization, economic growth and differentiation in the existing models of the last two decades in different countries, one should point out the technological core of the fifth technological set-up, the development of communication links and technologies, the information revolution, the emergence of the knowledge reproduction sector. Social economic formation is determined now as a new stage of economy development, i. e. the economy of knowledge. The growing role of knowledge was observed in their time by D. Bell, A. Touraine, A. Toffler and other theorists of post-industrial society. M. Castells highlights “the informational” formation in society development [7]. Every development mode is determined by the element that is fundamental to the development of economy and society. Having multiple set-ups, unevenness and economic differentiation in a regional context, Russia requires new theoretical and methodological decisions on identifying ways of industrialization today and solving the key problems of innovative economy development.

Diversified economic growth: the essence of regional economy diversification, the structure and the direction of economy diversification in Siberia. Reindustrialization is associated with the production transfer of to the rails of the latest technologies and technology related to the achievements of scientific and technological revolution. Due to the complexity of the political and economic situation for Russia in a “war of sanctions”, the global processes taking place, the need for new methods and approaches is actualized in the regional control system allowing to identify and reach a new level of regional competitiveness.

Thus, in terms of reindustrialization, which should not be limited only to the predominance of large machinery in the region economic structure, it is necessary to allocate the industrial and technological innovation aimed at increasing the products' share of raw materials in-depth

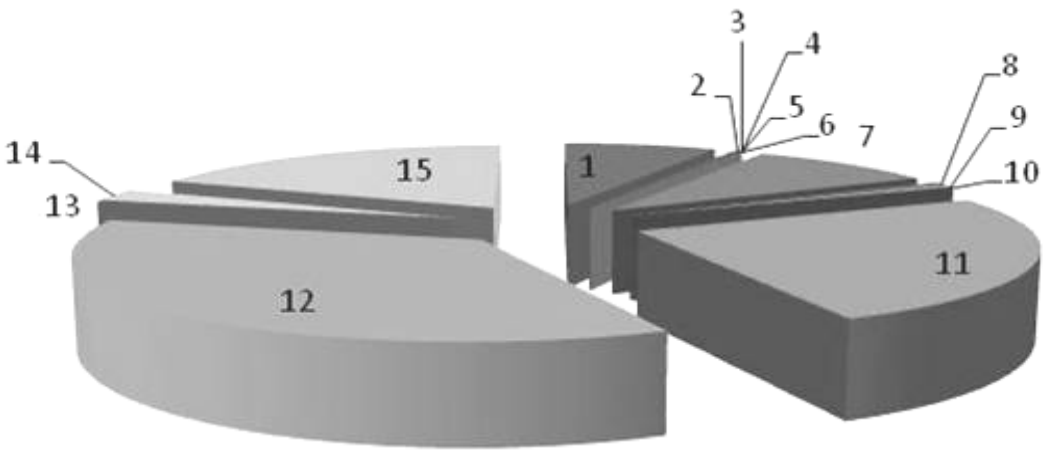
processing, the diversification of the regional economy, which is an important issue for the raw-material regions.

However, the industry structure in Siberia as a whole is not fundamentally different from the nationwide: the manufacturing sector accounts for a little less than 2/3 of output (in Siberia – 63.3 %, in Russia – 63.8 %), slightly more than 20 % – on share of mining (in Siberia – 21.4 %, in the Russian Federation – 22.6 %), the share of the production and distribution of electricity, gas and water accounts for about 14–15 % [9]. But if you consider these data at a lower integration level, the picture changes. Despite the similarity of the Siberian and Russian industrial structure, the significant differences in the structure in certain regions should be noted. The excess of the manufacturing industries share in total regional industrial production is characteristic of the four Russian Federation entities – Novosibirsk, Irkutsk, Omsk and Krasnoyarsk regions. A similar situation exists also in Altai region (the manufacturing industries share is almost 80 %). However, in the latter region the lion's share of production falls on the agricultural sector and food production, while the mentioned four areas just form "Siberian industrial zone". The share of almost all the regions leading in manufacturing industry in Siberia significantly fluctuated all the time, but the overall trend is clear – the undisputed leader was always Krasnoyarsk region. The share of the region rapidly grew in the second half of the 1990s. By 2000, this figure had increased by more than half compared with 1995, and almost twice compared with 1990. Later in the first half of 2000s there was a smooth decrease (almost to the level of 1995), and in the second half of the decade there were jumps from 20.6 to 260 %. The most important industry sector in Siberia has traditionally been MIC, whose enterprises manufactured important civil products in addition to military ones. In particular, almost all the high-tech engineering was concentrated in the military industry. The placement of such plants in the Urals was the result of Soviet industrial policy that considered the defense industry as the main flywheel of productive forces development. In addition, the defense industry distribution in the country was determined by the legacy of the war years (during the Great Patriotic War, the plants were transported from the European part behind the Urals), and by geopolitics (distributed MIC is more difficult to be captured hurriedly).

Today, the SFD does not take a leading position in the defense industry regional structure of the country. The main development trends are nationwide, in particular due to the subindustries consolidation process of Russian MIC by creating large integrated structures such as the state corporation "Russian Technologies" and many others. Regional structure of the defense industry in Siberia is heterogeneous and has a clear leader – Novosibirsk region which occupies one of the leading places among the federal subjects as a whole (in amount of defense enterprises). There are more than a third of the industrial enterprises here and less than half of MIC scientific organizations in Siberia.

In the sectoral structure of MIC in Siberia (in amount of companies) the ammunition and special chemicals industry dominates as well as conventional arms industry. It is worth noting that these subsectors both in the country and in Siberia are in a dire economic situation and their high role in the Siberian branch structure is in fact an additional source of problems for the regional "defense". Aeronautics is one of the leaders in the branch structure of MIC in Siberia. In Krasnoyarsk region there is JSC "Information Satellite Systems" named after M. F. Reshetnev", that is the basic scientific institution for the formation of the Russian GLONASS satellite system. There are dozens of the iconic companies of that kind in Siberia. This leads us to an important conclusion – the Siberian industry potential (including the defense one), created in Soviet times, is not lost, but every year the problem of personnel escalates at such plants, wear of equipment increases [8].

Mechanical engineering is one of the major industries in Siberian regions. By the end of the 80s it had accounted for more than 20 % of industrial production in the region. In 2008, the figure determined by the amount of economic activity was 9.2 %, while the share of the Siberian engineering in mechanical production of Russia stood at 7.4 %. The main types of machine industry in Siberia are electrical engineering, machine tool industry, aviation, mining and power engineering, mechanical engineering for the agribusiness complex, chemical and oil industry, instrument engineering. Regional economy diversification has different objectives as a tool for eliminating reproduction imbalances and redistributing resources and generally determines the economic restructuring direction. Diversification of the economy is a complex, ambiguous process. Different regions have their own diversification limits, the excess of which can lead to increased costs, reduced production efficiency. Diversification of production is the development of new activities, the simultaneous development of many product lines not related to each other, the expansion of manufactured products and services range. The regional economy diversification is the comprehensive industry development, the formation of multy-industrial crisis-resistant economic system in the region. In the raw-materials regions diversification determines the development of raw materials in-depth processing industries that have high added value. At the present stage of Russian industry development the question is raised on the diversification necessity on the basis of reindustrialization with the transition to technology and equipment of a higher order. The Russian economy is multiformal; the highest level of development is associated with the transition to the sixth technological set-up. In the economic literature diversification is generally considered as a basic economic development strategy of corporate structures. At the regional economy level the phenomenon of diversification strategy requires a detailed elaboration and selection of directions, along with the determination of diversification effects and results. Effecting positively on the development of the economy in general diversification processes of the regional economy contribute to the development of interregional and intraregional competition, they allow to saturate a market with goods, services, to increase the demand for goods and services among different social groups, etc.



The technological innovation cost within the manufacturing sector in Krasnoyarsk region in 2013, in mln rubles:
1 – food production; *2* – textile and clothing industry; *3* – leather, leather products and footwear production; *4* – wood processing and production; *5* – pulp and paper production, publishing and printing activity; *6* – coke and refined oils production; *7* – chemical production; *8* – manufacture of rubber and plastic products; *9* – manufacture of other non-metallic mineral products; *10* – metallurgical and metal wears production; *11* – machinery and equipment manufacture; *12* – manufacture of electrical and optical equipment; *13* – vehicles and equipment production; *14* – other industries not included in other categories of manufacturing industries; *15* – production and distribution of electricity, gas and water

The economy diversification can be implemented in the following directions [6]: new methods of work; new products and services development; adaptation of proven methods to new circumstances is also recognized as an effective meaningful way at the local innovative development, including unurbanized territories (the knowledge transfer from one region to another contributes to the innovative actions of that kind). We can identify the main trends and indicators in the regional management system defining its innovation, including the formation stages of knowledge-intensive, human resources and technological component of the regional strategic management system. The available experience analysis and evaluation of the innovative region development, both in domestic and foreign practice, have made it possible to identify individual systems used at the regional level to ensure implementation of the innovative development strategy of the region and the economic structure diversification. The result for the regional economy was the balance of the available infrastructure elements and innovative technologies, as well as a possible increase of regional product. Each region has a unique “local” potential for innovative development. Krasnoyarsk region is one of the most industrialized regions of Russia. Due to the natural resources many types of industrial activities are developed in the region, e. g. hydro power engineering, electro power engineering, non-ferrous metallurgy, mining, forest industry.

Our region heads the list in Russia in terms of gold mining; it mines 20 % of world nickel production. Key regional economy sectors play an important role not only on a state, but also on a global level. Mainly raw material orientation of the economy is the specific for Krasnoyarsk region, even taking into account other innovation indicators. Fundamentally new and innovative high-tech areas may be possible directions for the innovative advantages development of our region. Figure shows the technological innovation costs in the manufacturing sector in Krasnoyarsk region in 2013 [9].

This criterion measures the modernization initiatives presented by sectors of the regional economy. According to the annual results, there has been a significant costs increase of technological innovation in the electrical and optical equipment manufacturing. One of the regional companies invested 393 million rubles in the technical reequipment of the given industry in 2013. Previously more significant investments in the metallurgical industry and other industries were observed. JSC “ISS” implements projects on modernization of existing facilities within the Federal target programs. In 2013 the company invested 1.9 billion rubles. In 2014 it is planning to invest 2.6 billion rubles. JSC “ISS” increased the volume of output by 7 %; it comprised 31.3 billion rubles, in 2014 – 35.2 billion rubles. In December 2013 the spacecraft “Express-AM5” was successfully launched at the Baikonur Cosmodrome. It was created by JSC “ISS” for the national operator “Satellite Communication”. That is the first heavy class machine among the newest telecommunication satellites, as well as the most powerful among the previously created ones on the “ISS” [10]. In the economy structure diversification the promotion and support of private entrepreneurial initiative has the exceptional role, and with it the development of innovative entrepreneurship. According to the data of Krasnoyarsk regional fund to support scientific and technical activities, 27 small innovative enterprises were established with the assistance of the fund for the period of 2009–2012. The main issue is the innovative entrepreneurship development adjusted for the needs of each region in Siberian Federal District. SFD falls behind

the rest of Russia in terms of social development in general. For the period of 2008–2012 there was rather a regression of poverty and unemployment in this area, it served as indicators of the poor state of society. Therefore, the main indicators of social and economic development of Siberia must comply with the average level in Russia by 2020. The following areas have leading position in GDP (53.1 %) in the Russian Federation: financial activity (transactions with real estate, hotels, restaurants, show business, and public administration). In the real economy sector (46.9 % of GDP) fuel and energy complex dominates. This accounts for about 40 % of value added gross of the whole industry (SFD has about 50 %). In the fuel and energy complex of the Russian Federation, the growth of oil production amounted to about 3 % in 2013 in comparison with 1990, and gas – just over 2 %. Power generation remained at the 1990 level, and production of all types of fuel (gasoline, diesel and heating oil) decreased, as well as coal mining (domestic coal consumption falls).

The economic growth quality indicator is high-performance workplaces. In accordance with the decrees of the President of the Russian Federation, the country is to have 25 millions of workplaces by 2018. In connection with the recognition of the special role of the regional economy modernization and the implementation of prioritized government decisions, it is necessary not only to adhere to the development goals of Siberia in order to ensure sustainable life quality improvement through a balanced social and economic system of innovative type in accordance with the development strategy of Siberia until 2020. The priorities formation of the industrial sector in the regions is an objective necessity, and with it the identification of the components and factors of regional economy innovation benefits including the new high-tech areas. For a number of existing studies and ratings innovative development of regions including the Association of Innovative Regions of Russia and the HSE, some regions in SFD, Krasnoyarsk region lead in terms of research and development, the existing human potential. The economy diversification of Siberia built in the general context of structural reform, industrial development of the national economy, is designed to overcome the current orientation of the simplified technological diagram, the existing production facilities loses, to upgrade technological basis and reorient the economy of the regions different in their benefits to the prioritized high-tech development industries forming the economy competitiveness of the region and the country [11; 12].

Conclusion. It is necessary to determine the priority areas of technological development and reequipment in Siberian regions including Krasnoyarsk region taking into account its specific orientation as a raw material region, and with it the search for new technological solutions based on the latest technological set-up; increasing the share of high added value and knowledge-intensive industries; forming a search and selection system of breakthrough technology solutions; strengthening and formation of new relationships between the elements of the innovation infrastructure; stimulating demand and market development of innovative products in the region [13; 14]. The priority of long-term development objectives of Siberia involves the interaction of regional public authorities, local government and business in solving prioritized long-term objectives set out in the economic development strategy of Siberia as part of the following processes: provision of large-scale technological modernization; radical modernization of vocational education to meet the requirements of innovative development of modern society; provision of proactive development of transport, energy, construction and social infrastructure; implementation of investment projects for extracting and primary processing natural resources using the tools of public and private partnerships; sector development of natural raw materials in-depth processing; the formation of a unified system of industry, university and academic research centers in Siberia in order to create the infrastructure of scientific and technological centers; the regional technological development, giving priority to ecologically clean production technologies; the formation of effective mechanisms for the innovative technologies promotion in all sectors of the region economy. The main activities of the administration allowing us to solve the problem of regional innovative development are in this regard: the development and implementation of special target programs at the regional and local levels; provision with direct subsidies and target allocation by regional authorities to innovators; establishment of local tax exemptions for entities engaged in innovation, and interest rate subsidies on loans granted to them; the formation of science parks and regional high-technology centers; the creation of small business incubators; support for business networks and innovation clusters development; implementation of training programs and consulting innovative managers; distribution of “success stories” during the innovation implementation; the formation of regional integrated databases on the proposal and a request for innovation (R & D results, innovative projects, new products and services); creation of a monitoring system to promote and implement innovative projects in the region; reduction of administrative barriers for the innovative enterprises and projects organization; attracting venture capital in the region and support of regional venture capital funds. Priorities in a number of sectors are defined by public policy and prospects of development of the military-industrial complex (MIC) for the economy of Krasnoyarsk region. The priority objective is to make 2020 “scientific, technical, industrial and technological potential of the defense industry into the state-sponsored innovative resource efficient by accelerated technological modernization, implementation of its competitive advantages, and the development of human resources of the military-industrial complex”. Enabling factors of innovative development in other sectors of the economy of Siberia are necessary, and with it the formation of the innovative development strategy of Siberia and diversified areas of economic growth, taking into account certain “key competencies” of the industry in each region [15].

References

1. Bodrunov S. D. *Novaya industrializatsiya i modernizatsiya Rossii (publichnaya lektsiya)* [New

industrialization and modernization of Russia (public lecture)]. St. Petersburg, Institut novogo industrial'nogo razvitiya (INIR) Publ., 2012, 81 p.

2. Davydov A. A. [Innovation potential of Russia: present and future]. *Innovatsionnyy potentsial Rossii: nastoyashchee i budushchee*. FGBOU VPO "Institut sotsiologii Rossiyskoy akademii nauk" Institute of Sociology of the Russian Academy of Sciences. Available at: http://www.isras.ru/blog_modern_3.html (accessed 26.02.2015).

3. Perevalov Yu. [Conversion in Russia: unfulfilled hopes]. *Voprosy ekonomiki*. 1999, No. 7, P. 71–74 (In Russ.).

4. Korolev V. [The military-industrial complex in Russia: regulatory issues]. *Problemy teorii i praktiki upravleniya*. 1999, No. 4, P. 43–46 (In Russ.).

5. Baranov A. O., Pavlov V. N., Tagaeva T. O. [Disturbing prospects: the forecast of economic development of Russia for 2015-2017]. *EKO*, 2014, No. 12, P. 15–36 (In Russ.).

6. Sigeto Tsuru. *Konets yaponskogo "ekonomicheskogo chuda"* [The end of the Japanese "economic miracle"]. Transl. from Japanese Ramzes V. B. Edited and foreword Pevznera Ya. A. Moscow, Progress Publ., 1981, 272 p.

7. Kastel's M. *Informatsionnaya epokha: ekonomika, obshchestvo i kul'tura*. [Information Age: Economy, Society and Culture]. Transl. from English. Under scientific. ed. Shkaratan O. I. Moscow, GU VShE Publ., 2000, 608 p.

8. Sokolov A. [The industry islands]. *Ekspert Sibir'*. No. 5 (318) (In Russ.). Available at: http://expert.ru/siberia/2012/05/ostrovki-promyishlennosti (accessed 26.02.2015).

9. [The official portal of the Federal State Statistics Service]. *Ofitsial'nyy portal Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki*. Available at: http://www.krasstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/krasstat/ru/statistics/enterprises/science (accessed 26.02.2015).

10. Gavrilov A. I. *Regional'naya ekonomika i upravlenie*. [Regional Economics and Management]. Moscow, Yuniti Publ., 2002, 239 p.

11. *Innovatsionnyy potentsial nauchnogo tsentra: metodologicheskie i metodicheskie problemy analiza i otsenki*. [Science Centre Innovation Potential: methodological and methodical problems of analysis and assessment]. Novosibirsk, Sibirskoe Nauchnoe Izdatel'stvo Publ., 2007, 276 p.

12. Tatarkin A. I. *Konkurentosposobnost' regiona: novye tendentsii i vyzovy*. [The Competitiveness of the Region: New Trends and Challenges]. Ekaterinburg, IE UrO RAN Publ., 2003, 208 p.

13. Dynkin A. A., Kurenkov Yu. V. et al. *Konkurentosposobnost' Rossii v global'noy ekonomike*. [Competitiveness in Russia in global economy]. Moscow, Mezhdunar. Otnosheniya Publ., 2003, 376 p.

14. [Key indicators achieved by industries in Krasnoyarsk region at the end of 2013]. *Osnovnye pokazateli, dostignutye otraslyami promyshlennosti Krasnoyarskogo kraya po itogam 2013* goda. Available at: http://www.krskstate.ru/promtorg/results (accessed 26.02.2015).

15. Belyakova G. Ya., Sumina E. V. [Creating sustainable competitive advantages based on the concept of core competencies]. *Regional'naya ekonomika teoriya i praktika*. 2010, No. 41(176), P. 32–40 (In Russ.).

Библиографические ссылки

1. Бодрунов С. Д. Новая индустриализация и модернизация России (публичная лекция) / Институт нового индустриального развития (ИНИР). СПб, 2012. 81 с.

2. Давыдов А. А. Инновационный потенциал России: настоящее и будущее / ФГБОУ ВПО «Институт социологии Российской академии наук» [Электронный ресурс]. URL: http://www.isras.ru/blog_modern_3.html (дата обращения: 26.02.2015).

3. Перевалов Ю. Конверсия в России: несбывшиеся надежды // Вопросы экономики. 1999. № 7. С. 71–74.

4. Королев В. Оборонно-промышленный комплекс России: вопросы регулирования // Проблемы теории и практики управления. 1999. № 4. С. 43–46.

5. Баранов А. О., Павлов В. Н., Тагаева Т. О. Тревожные перспективы: прогноз развития экономики России на 2015–2017 гг. // ЭКО. 2014. № 12. С. 15–36.

6. Сигето Цуру. Конец японского «экономического чуда» / пер. с японского В. Б. Рамзеса ; общ. ред. и предисловие Я. А. Певзнера. М. : Прогресс. 1981. 272 с.

7. Кастельс М. Информационная эпоха: экономика, общество и культура : пер. с англ. / под науч. ред. О. И. Шкаратана. М. : ГУ ВШЭ, 2000. 608 с.

8. Соколов А. Островки промышленности [Электронный ресурс] // Эксперт Сибирь. № 5 (318). URL: http://expert.ru/siberia/2012/05/ostrovki-promyishlennosti (дата обращения: 26.02.2015).

9. Официальный портал Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: http://www.krasstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/krasstat/ru/statistics/enterprises/science (дата обращения: 26.02.2015).

10. Гаврилов А. И. Региональная экономика и управление : учеб. пособие. М. : Юнити, 2002. 239 с.

11. Инновационный потенциал научного центра: методологические и методические проблемы анализа и оценки / под ред. В. И. Суслова. Новосибирск : Сибирское научное изд-во, 2007. 276 с.

12. Конкурентоспособность региона: новые тенденции и вызовы / под ред. чл.-кор. АН А. И. Татаркина. Екатеринбург : ИЭ УрО РАН, 2003. 208 с.

13. Конкурентоспособность России в глобальной экономике / А. А. Дынкин [и др.] М. : Междунар. отношения, 2003. 376 с.

14. Основные показатели, достигнутые отраслями промышленности Красноярского края по итогам 2013 года [Электронный ресурс]. URL: http://www.krskstate.ru/promtorg/results2013 (дата обращения: 26.02.2015).

15. Белякова Г. Я., Сумина Е. В. Формирование устойчивых конкурентных преимуществ компаний на основе концепции ключевых компетенций // Региональная экономика : теория и практика. 2010. № 41(176). С. 32–40.

© Sumina E. V., Zyablikov D. V., 2015

УДК 658

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 2. С. 523–529

РИСКИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В. Н. Товстоношенко

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

В современных условиях ракетно-космическая промышленность (РКП) является базовым элементом отечественного космического потенциала, конкурентоспособной на мировом рынке ракетно-космической техники и отличается наукоемкими, высокотехнологичными производственными процессами и создаваемыми изделиями, обладает высокими инновационными возможностями, эффективная реализация которых способна оказать влияние на развитие экономики России. Инновационная деятельность предприятий ракетно-космической промышленности связана с большими затратами по разработке новых проектов ракетно-космической техники, финансирование которых осуществляется в основном из бюджетных источников, из средств венчурных и специальных фондов. В процессе инновационной деятельности в силу неопределенности условий развития возникают ситуации риска, обусловленные наличием ряда факторов, связанных с нестабильностью экономической конъюнктуры рынка, геополитической обстановкой в мировом сообществе и влияющих на результат деятельности предприятий ракетно-космической промышленности. Результат разрабатываемых проектов инновационной деятельности зависит от уровня риска и степени неопределенности, и в связи с этим необходимо производить их оценку и управлять ими. В ходе исследования были определены факторы и причины возникновения рисков инновационной деятельности предприятий, а также их основные функции и характеристики. Предложена классификация рисков с позиции положительного и отрицательного влияния на инновационную деятельность предприятий ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: неопределенность, риск инновационной деятельности, факторы и причины риска, основные функции рисков, классификация рисков, характеристика риска.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 523–529

INNOVATION ACTIVITIES RISKS OF THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

V. N. Tovstonoshenko

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

In modern conditions the rocket and space industry (RCP) is a basic element of domestic space potential, competitive on the world market of space technology and different high-tech production processes and created products, has a high innovative potential, effective implementation which is able to influence the development of Russian economy. Innovative activity of the enterprises of rocket and space industry is associated with high costs for the development of new rocket and space technology projects, financed mainly from budget sources of venture funds and special funds. In the process of innovation due to the uncertainty of conditions for the development of situations of risk, due to the presence of a number of factors associated with the instability of the economic market conditions, geopolitical situation in the world community and influencing the activity of the enterprises of rocket and space industry are appeared. The result of the developed projects of innovative activity depends on the level of risk and uncertainty and it is therefore necessary to evaluate and manage them. The study identified the factors and causes of risks of innovation activity of enterprises, as well as their main functions and characteristics. In this paper, we propose a classification of risks the positions of the positive and negative impact on the innovative activity of the enterprises of rocket and space industry.

Keywords: Uncertainty, risk, innovation, factors and causes of risk, the basic functions of risk, risk classification, risk characterization.

Введение. Ракетно-космическая промышленность – одна из наиболее технически развитых отраслей машиностроения с высокой степенью кооперирования и концентрации производства, и её развитие является одним из ключевых приоритетов российской промышленной политики. РКП состоит из совокупности предприятий, научно-исследовательских учреждений и проектно-конструкторских организаций по разра-

ботке, производству и модернизации ракетно-космической техники. Предприятия отрасли выпускают космическую продукцию, боевые ракеты и комплексы, а также производят непрофильную продукцию, составляющую треть общего объема производства ракетно-космической промышленности. Разработка ракетно-космической техники характеризуется высокой наукоемкостью, значительной трудоемкостью, длительными сроками разработки и проведения испытаний. Для удержания передовых позиций в экономике ракетно-космическая промышленность должна постоянно подтверждать свою высокую эффективность и готовность соответствовать самым современным требованиям технологии производства [1].

Одной из особенностей ракетно-космической деятельности является использование уникального оборудования, дорогостоящих образцов космической техники, сложных наземных и орбитальных систем и технологий. При этом космическая техника и используемые технологии могут являться источниками опасностей, представляющих угрозу здоровью и жизни обслуживающего персонала и населения, собственнику космической техники и потребителю результатов космической деятельности. Несмотря на высокий уровень развития современных технологий производства продукции, вероятность аварии и повреждения изделий ракетно-космической техники сохраняется, особенно на этапах разработки, подготовки и проведения пуска ракет космического назначения, ввода в эксплуатацию и летной эксплуатации космических аппаратов. Все эти ситуации необходимо предвидеть, контролировать и предотвращать. Но, если учесть, что существует высокий уровень неопределенности, то сделать это достаточно сложно, приходится рисковать в той или иной степени.

Характеристика, факторы и причины возникновения рисков. Риск – это количественная характеристика, определяющая вероятность наступления неблагоприятного события, влияющего на итоговые показатели инновационной деятельности предприятий [2; 3]. Ещё Ф. Найт в своей работе «Риск, неопределенность и прибыль» определял риск как измеримую неопределенность, когда предприниматель может «предвидеть» или «угадать» основные параметры (условия, результаты) своего дела в будущем [4]. Риски характеризуются пропорциональной зависимостью между уровнем риска и новизной инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности. С одной стороны, риск может стать источником как убытка, так и прибыли организации. Если не учитывать возможность появления риска, то, скорее всего, финансовым результатом предприятия будет убыток. С другой стороны, грамотный анализ, расчет вероятности наступления риска и правильное принятое управленческое решение поможет не только избежать наступления негативного события, но и повернуть ситуацию так, что она благотворно скажется на деятельности предприятия в виде прибыли. Рассматривая ситуации с наступлением риска, выделим его следующие характеристики:

1) опасность – потенциальная угроза возникновения ущерба или другой формы реализации риска, обусловленная спецификой объекта, особенностями рисковой ситуации и природой указанного ущерба. Данная характеристика отражает взаимодействие двух элементов носителя риска, т. е. объекта или субъекта, по отношению к которым риск оценивается, и окружающей среды, провоцирующей реализацию риска;

2) подверженность риску – это характеристика ситуации, чреватой возникновением ущерба или другой формы реализации риска, выраженная в количестве единиц наблюдения;

3) уязвимость – выражает степень или интенсивность, с которой возникает ущерб различного размера в отношении рассматриваемого объекта [5].

Анализируя взаимодействие рисков, видим, что одни риски оказывают влияние на другие под воздействием различных факторов как внешней, так и внутренней среды. Данные факторы влекут за собой появление причин риска. В отличие от факторов причины являются более конкретными и непосредственно вызывают возникновение риска. В табл. 1 представлены факторы и причины появления риска [6].

Функции и классификация рисков. Превращение риска в инструмент регулирования экономических отношений инновационной деятельности происходит с помощью выполняемых им функций, нацеленных на предупреждение нежелательных последствий управленческих решений. Основными функциями риска являются:

1) регулятивная – с одной стороны, играет роль катализатора, который способствует, например, внедрению инноваций, а с другой – принимает деструктивный характер и при принятии управленческого решения ведет к авантюризму;

2) предупредительная функция – заключается в том, что специалисты предприятия принимают управленческое решение более выгодное и менее рискованное посредствам всестороннего глубокого анализа альтернатив;

3) инновационная функция – способствует принятию новаторского решения, а также внедрению ресурсосберегающих технологий, информационно-компьютерной поддержки технологических процессов;

4) стимулирующая функция побуждает развитие и обогащение творческой деятельности специалистов предприятия, инициирует тщательный анализ и поиск возможностей предотвращения риска;

5) защитная функция – направлена на поиск средств и форм защиты от нежелательных последствий рискованных управленческих решений. Таким образом, риск выступает индикатором, сигнализирующим о возможном наступлении негативного события;

6) социальная функция – обеспечение материальной защиты работников, вовлеченных в рискованную деятельность, благодаря перераспределению сверхдоходов, полученных в результате этой деятельности;

7) компенсационная функция риска – заключается в создании специального фонда риска, предназначенного для преодоления последствий рисковых ситуаций;

8) контрольная функция риска – предполагает контроль качественных и количественных критериев риска, их оценку при принятии управленческого решения [7].

Таблица 1

Факторы и причины возникновения риска

По отношению к организации	Факторы возникновения рисков	Причины возникновения рисков
Внешние	Состояние и тенденции изменения конъюнктуры рынка, уровня конкуренции, геополитической обстановки	Изменения внешней среды, которые вынуждают изменить условия договора; инфляция, расширение в последние годы рынка коммерческих космических услуг
	Характеристики инфраструктуры рынка, изменения законодательной политики	Изменение физических условий перемещения товарных, финансовых и трудовых ресурсов между субъектами (аварии, изменения таможенных условий, структуры, сроков и объемов ассигнований, изменения в российском и международном законодательстве по снижению неблагоприятного воздействия ракетно-космической деятельности)
	Специфика отрасли, сфера деятельности организации	Изменение личных отношений между руководителями. Изменение целевых установок субъекта, связанных с повышением его статуса, приобретением определенного опыта, связей, изменение индивидуальной или групповой психологии, покупательской способности, структуры потребления Появление более выгодных для организации предложений
Внутренние	Кадровая политика предприятия, психологический климат коллектива, уровень квалификации персонала	Ошибки в результате некомпетентности, недобросовестности сотрудников
	Уровень используемых технологий	Принятие необоснованных стратегических и оперативных решений
	Качество процессов и системы управления в целом	Несоответствие продукции и ее качества
	Характеристика и уровень конкурентоспособности продукции, услуг	Поломка оборудования, отказ в работе информационных и телекоммуникационных систем

Большое количество исследователей, занимающихся вопросами управления рисков, дают общую классификацию рисков (рис. 1) [8–10]. На основании данной классификации рисков выделим группы, характерные для предприятий ракетно-космической промышленности: по местоположению относительно объекта, в зависимости от события и по возможности страхования и с позиции вероятности возникновения определенного уровня потерь, остальные группы так или иначе входят в эти. Рассмотрим более подробно признаки классификации и соответствующие им группы рисков.

По месту положения относительно объекта риски подразделяются на внутренние и внешние. К внутренним рискам инновационной деятельности относят [11]:

– риски ошибочного выбора инновационного проекта, причиной возникновения которого является недостаточно обоснованный выбор приоритетов экономической и рыночной стратегии предприятий ракетно-космической промышленности;

– риск необеспечения достаточным уровнем финансирования инновационного проекта – недополучено средств для разработки проекта или из-за неправильного выбора источников финансирования;

– риск неиспользования хозяйственных договоров – включает в себя риск отказа от заключения договоров после проведения переговоров в случае изменения экономической конъюнктуры; риск невыполнения договорных обязательств партнерами в срок или заключения договоров на невыгодных условиях;

– риск, связанный с обеспечением прав собственности – возникает по следующим причинам: неполучение или долгое оформление патента, несвоевременное получение лицензии, при неуплате в установленный срок пошлин за поддержание патента в силе и пр.

Внешние риски включают в себя следующие виды:

– рыночный риск, связанный с колебаниями рыночной конъюнктуры, изменением цен на сырье, материалы, комплектующие изделия, а также изменением валютного курса;

– политический риск – возникает при неопределенности политической ситуации, неблагоприятных социально-политических изменений в мире, стране или регионе.

В зависимости от события риски подразделяются на чистые и спекулятивные [12]. Чистые риски означают возможность получения отрицательного или нулевого результата. К ним относятся природно-естественные, экологические, политические, транспортные и коммерческие риски, однако последние исключают финансовый риск, поскольку он может обернуться как положительно, так и отрицательно для организации. Таким образом, он относится к спекулятивным. Финансовый риск – это вероятность возникновения убытков, прибыли или недополучения доходов по сравнению с прогнозируемым вариантом. Он может быть связан с покупательной способностью денег, а также проявляться в виде инвестиционного риска [13].

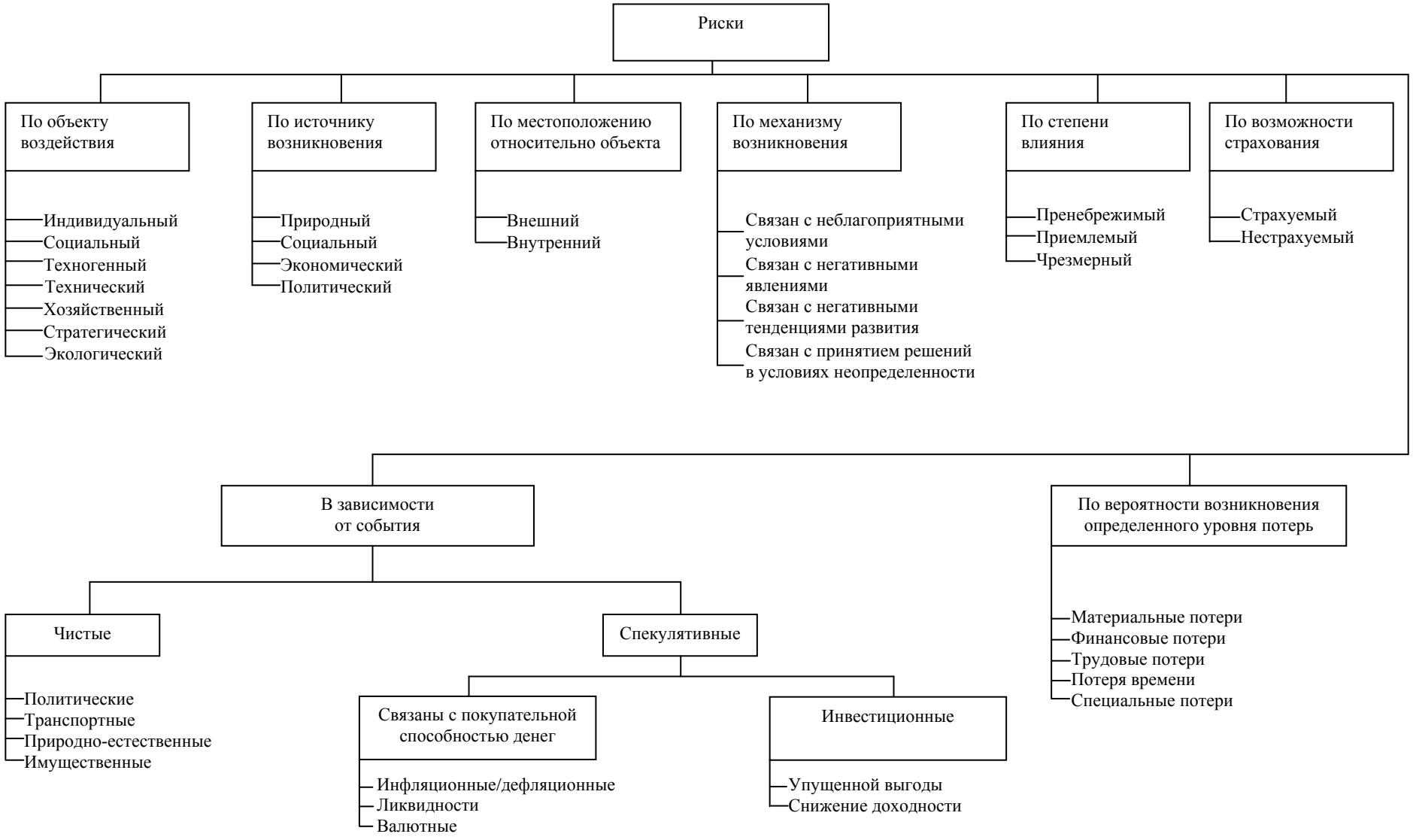


Рис. 1. Общая классификация рисков

С позиции вероятности возникновения определенного уровня потерь риски подразделяются:

– на риски материальных потерь, проявляющиеся в виде прямых потерь имущества, оборудования;

– риски финансовых потерь, связанные с прямым денежным ущербом, который выражается в виде непредусмотренных платежей, уплатой штрафов, потерей денежных средств и ценных бумаг, недополучением денег из предусмотренных источников, ростом цен на товары, изменением валютного курса рубля, несвоевременной выдачей средств;

– риски трудовых потерь;

– риски потери времени – потеря рабочего времени в связи с замедлением инновационных процессов;

– риски специальных видов потерь – возможность нанесения ущерба здоровью, жизни людей, клиентов, окружающей среде, престижу организации [14].

На основании вышеизложенного выделим основные группы рисков инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности (рис. 2). Наибольшую часть классификации составляют инновационные риски, поскольку данная деятельность напрямую сопряжена с организацией и управлением процессом создания ракетно-космической техники с использованием новейших разработок науки и техники, основанных на новейших технологиях.

Коммерческие риски присущи предприятиям РКП и подразделяются на риск дефицита материальных ресурсов на рынке и ценовой риск. Риск дефицита характерен для тех случаев, когда необходимо выполнить уникальный заказ. Ценовые риски заключаются в изменении цены поставщиков, происходящем из-за инфляции и пр.

Экономические риски, обусловленные текущим состоянием экономики страны и тенденциями её развития, напрямую оказывают влияние на деятельность организации. Экономический риск связан с формированием ресурсов, капитала, доходов и финансовых результатов предприятия, характеризуется возможными денежными потерями в процессе осуществления экономической деятельности. Данная группа рисков включает в себя риск инфляции или дефляции, валютный риск [14].

Политические риски немало значимы для предприятий ракетно-космической промышленности, поскольку они сотрудничают с зарубежными поставщиками, поэтому на процесс поставки продукции оказывают влияние международные отношения, проявляющиеся в виде несоответствия законов стран, отсутствия договоренностей по единым стандартам, что облегчило бы, например, процедуру перевозки. На сегодняшний день сказываются санкции Европейского союза из-за кризиса на Украине, повлекшего запрет ввоза комплектующих изделий для создания элементов и систем ракетно-космической техники.

Отраслевой риск связан с политическим и экономическим, однако целесообразно выделить его в отдельную группу, тем самым показав его влияние на инновационный процесс предприятия. Вообще все предприятия отрасли подвержены неожиданным, иногда резким изменениям, поэтому любая организация должна учитывать этот вид риска вне зависимости от ее вида деятельности. Данная группа включает риск изменения конъюнктуры рынка, риск структурных изменений, связанный с переходом на новые технологии [15–17].

Рассматривая классификацию рисков инновационной деятельности предприятий РКП, можно сказать, что некоторые виды рисков приносят только убытки, другие имеют двойную природу, поэтому приносят как прибыль, так и убытки (табл. 2).

Заключение. На основании исследования можно сделать вывод, что большинство рисков негативно сказываются на инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности. Это подтверждает необходимость в анализе, расчете и управлении рисковыми ситуациями. Даже те риски, которые имеют двойную природу, могут негативно сказаться на финансовом результате при неблагоприятном исходе развития события, что, естественно, нежелательно для предприятия. Следовательно, каждое предприятие ракетно-космической промышленности заинтересовано в повышении стоимости инновационного продукта, что может обеспечить система управления рисками инновационной деятельности предприятий РКП. Она позволяет эффективно управлять будущими событиями, которые находятся в состоянии неопределенности, а также снижать возможность появления негативных событий, способствующих снижению рисков.

Таблица 2

Классификация рисков с позиции положительного и отрицательного влияния на инновационную деятельность предприятия

Риски, приносящие убытки	Риски, имеющие двойную природу
Риск ошибочного выбора инновационного проекта	Ценовые риски
Риск непредусмотренных платежей	Риск дефляции
Риск форс-мажора	Валютный риск
Риск нарушений условий договора	Риск, связанный с национальными традициями
Риск недостаточного уровня кадрового обеспечения	Риск недостаточного уровня кадрового обеспечения
Риск несвоевременного получения денежных средств	Риск обеспечения прав собственности на инновационный проект
Технологический риск	Риск, связанный с испытанием космического аппарата
Риск дефицита материальных ресурсов	Риск изменения конъюнктуры рынка
Риск инфляции	Риск структурных изменений
Риск уплаты штрафов	Маркетинговый риск

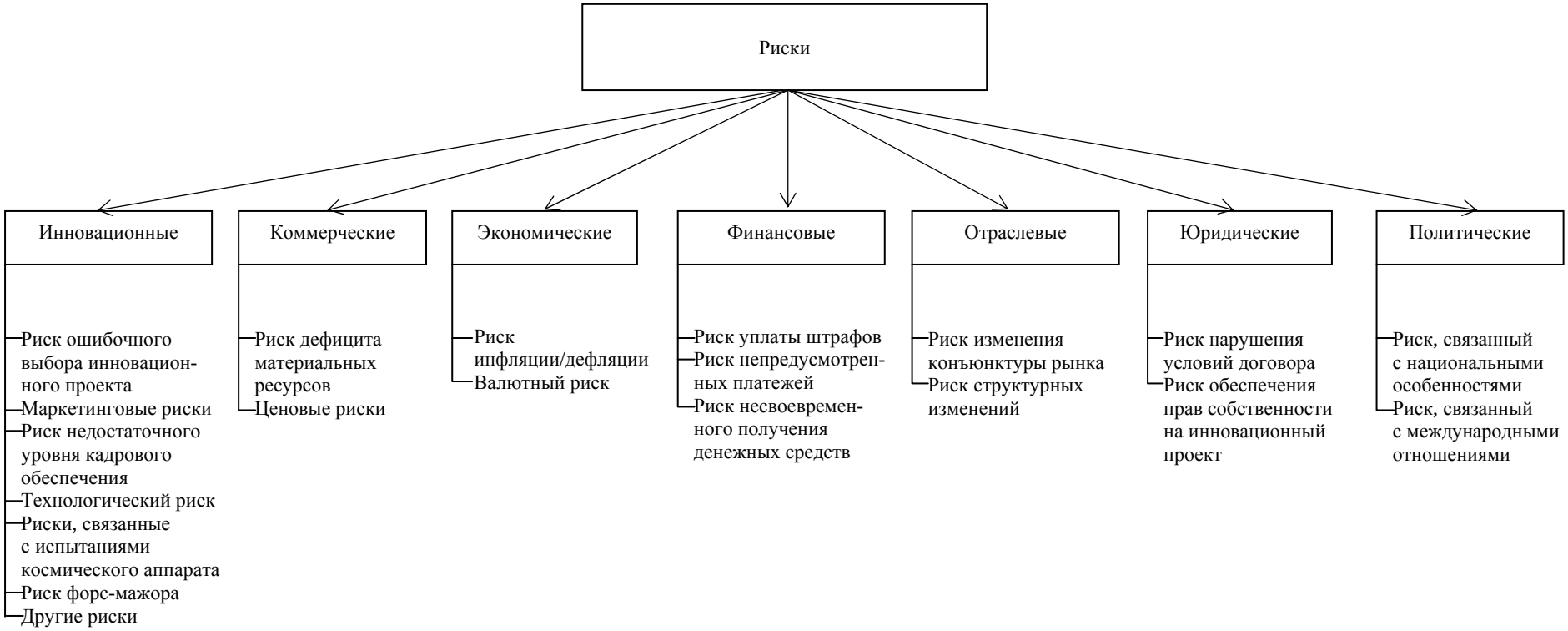


Рис. 2. Классификация рисков инновационной деятельности предприятий РКП

Библиографические ссылки

1. Перминов А. Н. Модернизация ракетно-космической промышленности на современном этапе: проблемы и пути решения [Электронный ресурс]. URL: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK- 7/III/Perminov.pdf.
2. Балдин К. В., Воробьев С. И. Управление рисками. М. : Юнити-Дана, 2010. 40 с.
3. Ермасова Н. Б. Риск-менеджмент организации. М. : Дашков и К, 2009. 380 с.
4. Полозова А. Н. Угрозы, риски и неопределенности в бизнес-деятельности сложных организационных систем // Управление риском. 2004. № 1. С. 59–64.
5. Шапкин А. С., Шапкин В. А. Экономические и финансовые риски. Оценка, управление, портфель инвестиций. М. : Дашков и К, 2009. 544 с.
6. Основы предпринимательской деятельности. Финансовый менеджмент / под ред. В. М. Власовой. М. : ФиС, 2007. 180 с.
7. Балдин К. В. Риск-менеджмент. М. : Эксмо, 2006. 368 с.
8. Вишняков Я. Д. Общая теория рисков. М. : Академия, 2008. 368 с.
9. Лагуста М. Г. Риски в предпринимательской деятельности. М. : Инфра-М, 2009. 503 с.
10. Романов В. А., Бутуханов А. Г. Рискообразующие факторы: характеристика и влияние на риски. СПб. : Крона, 2011. 320 с.
11. Товстоношенко В. Н., Буланкин А. Ю. Риски инновационной деятельности РКП // В мире научных открытий (Социально-гуманитарные науки). 2014. № 11.9 (59) С. 3436–3447.
12. Уродовских В. Н. Управление рисками предприятия. М. : Инфра-М, 2010. 168 с.
13. Ковалев В. В. Финансовый менеджмент: теория и практика. М. : ТК Велби : Проспект, 2006. 384 с.
14. Рыхтикова Н. А. Анализ и управление рисками организации. М. : ФОРУМ, 2010. 240 с.
15. Ступаков В. С., Токаренко Г. С. Риск-менеджмент. М. : Финансы и статистика, 2005. 288 с.
16. Бабин В. А. Практические аспекты оценки риска в бизнесе // Управление риском. 2004. № 3. С. 18–20.
17. Минат В. Н. Финансовая среда предпринимательства и предпринимательские риски. М. : Экзамен, 2006. 368 с.

References

1. Perminov A. N. *Modernizatsiya raketno- kosmicheskoy promyshlennosti na sovremennom etape: problemy i puti resheniya* [Modernization of the spacerocket industry at the present stage: problems and solutions]. Available at: http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK- 7/III/Perminov.pdf (accessed 21.01.2015).
2. Baldin K. V., Vorob’ev S. I. *Upravlenie riskami.* [Risk management]. Moscow, Yuniti-Dana Publ., 2010, 40 p.
3. Ermasova N. B. *Risk-menedzhment organizatsii*. [Risk-menedgment]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2009, 380 p.
4. Polozova A. N. [Threats, risks and uncertainties in the business activity of complex organizational systems] *Upravlenie riskom.* 2004, No 1, P. 59–64 (In Russ.).
5. Shapkin A. S., Shapkin V. A. *Ekonomicheskie i finansovye riski. Otsenka, upravlenie, portfel' investitsiy*. [Economic and financial risks. Assessment, management, investment portfolio]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2009, 544 p.
6. Vlasovoy V. M. *Osnovy predprinimatel'skoy deyatel'nosti. Finansovyy menedzhment*. [Fundamentals of business. Financial management]. Moscow, FiS Publ., 2007, 180 p.
7. Baldin K. V. *Risk-menedzhment*. [Risk management]. Moscow, Eksmo Publ., 2006, 368 p.
8. Vishnyakov Ya. D. *Obshchaya teoriya riskov.* [General theory of risk]. Moscow, Akademiya Publ., 2008, 368 p.
9. Lagusta M. G. *Riski v predprinimatel'skoy deyatel'nosti*. [Risks in business]. Moscow, Infra-M Publ., 2009, 503 p.
10. Romanov V. A., Butukhanov A. G. *Riskoobrazuyushchie faktory: kharakteristika i vliyanie na riski*. Risk factors: characteristics and impact on risks]. St. Petersburg, Krona Publ., 2011, 320 p.
11. Tovstonoshenko V. N., Bulankin A. Yu. [Risks innovation RSI]. *V mire nauchnykh otkrytiy (Sotsial’no-gumanitarnye nauki).* 2014, No. 11.9 (59), P. 3436–3447 (In Russ.).
12. Urodovskikh V. N. *Upravlenie riskami predpriyatiya.* [Enterprise risk management]. Moscow, INFRA-M Publ., 2010, 168 p.
13. Kovalev V. V. *Finansovyy menedzhment: teoriya i praktika.* [Century Financial management: theory and practice]. Moscow, TK Velbi, Prospekt Publ., 2006, 384 p.
14. Rykhtikova N. A. *Analiz i upravlenie riskami organizatsii*. [Analysis and risk management]. Moscow, FORUM Publ., 2010, 240 p.
15. Stupakov V. S., Tokarenko G. S. *Risk-menedzhment.* [Risk management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2005, 288 p.
16. Babin V. A. [Practical aspects of risk assessment in business]. *Upravlenie riskom.* 2004, No. 3, P. 18–20 (In Russ.).
17. Minat V. N. *Finansovaya sreda predprinimatel'stva i predprinimatel'skie riski*. [Financial environment of entrepreneurship and entrepreneurial risks]. Moscow, Ekzamen Publ., 2006, 368 p.

© Товстоношенко В. Н., 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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.

Антамошкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oleslav@mail.ru.

Ахметжанов Руслан Ваисович – инженер, Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: akhmetzhanov.riame@yandex.ru.

Барабанов Сергей Александрович – аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); главный инженер проекта ООО «Энергоавтоматика». E-mail: barabanov.sergey@gmail.com.

Белолипецкий Виктор Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом вычислительной гидродинамики, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: belolip@icm.krasn.ru.

Белякова Елена Владимировна – доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ev_belyakova@rambler.ru.

Бирюков Василий Иванович – доктор технических наук, доцент, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: aviatex@mail.ru.

Богатый Александр Владимирович – научный сотрудник, Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: boga-alex@yandex.ru.

Высотин Максим Александрович – аспирант, Сибирский федеральный университет. E-mail: cianol@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Гомонова Ольга Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gomonova@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.

Денисов Вадим Прокопьевич – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем, Томский университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: dvp15@sibmail.com.

Денисов Виктор Михайлович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: VDenisov@sfu-kras.ru.

Дорофеев Максим Олегович – начальник группы 9358 общего проектирования, испытаний и эксплуатации бортовых комплексов контроля положения и формы рефлектора отдела 935 проектирования и испытания систем ориентации и стабилизации космических аппаратов, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: magsau@mail.ru.

Дронов Павел Александрович – кандидат технических наук, начальник группы, ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики». E-mail: abel-cadb@yandex.ru.

Дубинин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и защиты информации, Томский университет систем управления и радиоэлектроники. E-mail: dima@info.tusur.ru.

Дьяконов Григорий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: riame3@sokol.ru.

Еремеева Светлана Витальевна – старший преподаватель кафедры бухгалтерского учета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ixx@list.ru.

Еременко Наталья Валерьевна – магистрант, Сибирский федеральный университет; переводчик, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: erko@iss-reshetnev.ru.

Еремина Анастасия Денисовна – студентка, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: wollen07@yandex.ru.

Ермаков Дмитрий Владимирович – инженер-конструктор первой категории, АО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET.

Ермошкин Юрий Михайлович – кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: erm@iss-reshetnev.ru.

Зыкова Татьяна Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: zykovatv@mail.ru.

Зябликов Дмитрий Валерьевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры теоретических основ экономики, Сибирский федеральный университет. E-mail: rewtyu@mail.ru.

Иванов Андрей Владимирович – доктор технических наук, главный конструктор, ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики». E-mail: abel-cadb@yandex.ru.

Казаковцев Лев Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: levk@ieee.org.

Карпов Игорь Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Ключников Александр Васильевич – кандидат технических наук, начальник конструкторского отдела, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е. И. Забабахина». E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru.

Ковалева Евгения Андреевна – аспирант, лаборант-исследователь, Сибирский федеральный университет. E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru.

Кочев Юрий Владимирович – кандидат технических наук, начальник группы, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: koch@iss-reshetnev.ru.

Кочегуров Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru.

Кретинин Василий Васильевич – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rob@iph.krasn.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Крылов Юрий Валерьевич – инженер-конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru.

Кузнецов Петр Анатольевич – ассистент, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: forubox@yandex.ru.

Кузубов Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической и неорганической химии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Куклин Артем Валентинович – аспирант, инженер-исследователь, Сибирский федеральный университет. E-mail: artem.icm@gmail.com.

Лаевский Виктор Евгеньевич (V. Geringer) – кандидат технических наук, заведующий лабораториями автомобильной электроники и регенеративных источников энергии, Государственный объединённый университет Баден-Вюртемберг. E-mail: geringer@DHBW-Ravensburg.de.

Латушкина Лариса Леонидовна – старший преподаватель, Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета. E-mail: Latush2003@mail.ru.

Лепешев Анатолий Александрович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Лихачев Максим Васильевич – ведущий инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: max_kzk@catiaforum.ru.

Михалева Наталья Сергеевна – младший научный сотрудник, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Михов Евгений Дмитриевич – инженер, Сибирский федеральный университет. E-mail: edmihov@mail.ru.

Морозов Егор Александрович – начальник управления информационного обеспечения – начальник отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: info@iss-reshetnev.ru.

Онисифорова Екатерина Валерьевна – кандидат экономических наук, ассистент кафедры международного кадрового и проектного управления, Международная высшая школа бизнеса, Сибирский государственный аэрокосмический университете имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kath.gasenko@ya.ru.

Пискажова Татьяна Валериевна – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и теплотехники в металлургии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: piskazhova@ya.ru.

Попов Захар Иванович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики СО РАН. E-mail: zipcool@bk.ru.

Раводина Дарья Владимировна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Романова Оксана Борисовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rob@iph.krasn.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва. E-mail: safonovkv@rambler.ru.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Сидельников Андрей Сергеевич – ассистент кафедры литейного производства, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: andsidelnikov@yandex.ru.

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Сидорова Татьяна Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: stany6@yandex.ru.

Ситников Максим Николаевич – аспирант, ассистент кафедры физики, инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kineru@mail.ru.

Сумина Екатерина Владимировна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры международного бизнеса, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sumina@sibsau.ru.

Тайгин Виталий Борисович – начальник сектора, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: taygin87@mail.ru.

Тестоедов Николай Алексеевич – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, генеральный директор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Товстоношенко Валентина Николаевна – доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: teachervalua@mail.ru.

Тронин Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем, Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет. E-mail: toa12@yandex.ru.

Трофимчук Денис Александрович – ведущий инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: trofden@mail.ru.

Трушкина Татьяна Владимировна – инженер-технолог 1 категории, АО «Красноярский машиностроительный завод». E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Турчинович Анна Олеговна – преподаватель кафедры инженерных проблемы экологии, факультет летательных аппаратов, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: golubevaa@ngs.ru.

Ушаков Анатолий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры современного естествознания, Гуманитарный институт, Сибирский федеральный университет. E-mail: ushackov@mail.ru.

Федоров Леонид Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Филюшина Елена Владимировна – доцент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: filyushina@sibsau.ru.

Харьков Антон Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики, младший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: khark.anton@mail.ru.

Чжан Екатерина Анатольевна – аспирант, Сибирский федеральный университет, ekach@list.ru.

Шайхадинов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Шостак Светлана Александровна – студентка, Сибирский федеральный университет. E-mail: sa.shostakk@gmail.com.

Якивьюк Павел Николаевич – аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и теплотехники в металлургии, Институт цветных металлов и материаловедения, Сибирский федеральный университет. E-mail: PavelYakivyuk@yandex.ru.

Якимов Евгений Николаевич – главный конструктор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: yen@iss-reshetnev.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akhmetzhanov Ruslan Vaisovich – engineer, Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow aviation institute (national research university). E-mail: akhmetzhanov.riame@yandex.ru.

Aleshechkin Andrey Mikhaylovich – Dr. Sc., Docent, professor of Radioelectronics Systems Department, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru.

Antamoshkin Alexander Nikolaevich – Dr. Sc., professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: oleslav@mail.ru.

Barabanov Sergey Alexandrovich – postgraduate student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Project Director of LLC "Energoavtomatika". E-mail: barabanov.sergey@gmail.com.

Belolipetskii Viktor Mikhailovich – Dr. Sc., Professor, Head of Computational Hydrodynamics Department, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: belolip@icm.krasn.ru.

Belyakova Elena Vladimirovna – Dr. Sc., Docent, Head of Logistics Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ev_belyakova@rambler.ru.

Biruykov Vasiliy Ivanovich – Dr. Sc., Docent, professor of Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: aviatex@mail.ru.

Bogatyi Aleksandr Vladimirovich – researcher, Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: boga-alex@yandex.ru.

Chzhan Ekaterina Anatol'evna – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: ekach@list.ru

Denisov Vadim Prokop'evich – Dr. Sc., Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics. E-mail: dvp15@sibmail.com.

Denisov Viktor Mikhailovich – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Physical and Inorganic Chemistry, Siberian Federal University. E-mail: VDenisov@sfu-kras.ru.

Dorofeev Maxim Olegovich – chief of group 9358 of general design, tests and operation of onboard complex control of reflector's position and form of department 935 design and test of systems of orientation and stabilization of spacecraft, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: magsau@mail.ru

Dronov Pavel Aleksandrovich – Cand. Sc., chief of section, JSC "Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiky". E-mail: abel-cadb@yandex.ru.

Dubinin Dmitry Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Department of Radioelectronics and Data Protection, Tomsk State University of Control System and Radioelectronics. E-mail: dima@info.tusur.ru.

Dvirnyi Guryi Valeryevich – Cand. Sc., associate engineer for commissioning and testing, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: dg1802@mail.ru.

Dvirnyi Valeryi Vasilyevich – Dr. Sc., Professor, intellectual property discovery and protection chief specialist, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Dyakonov Grigoriy Aleksandrovich – Cand. Sc., senior researcher, Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: riame3@sokol.ru.

Eremeeva Svetlana Vital'evna – senior lecturer, Department of Accounting, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ixx@list.ru.

Eremenko Natalya Valeryevna – Master's Degree student, Siberian Federal University, interpreter, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: erko@iss-reshetnev.ru.

Eremina Anastasia Denisovna – student, Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: wollen07@yandex.ru.

Ermakov Dmitriy Vladimirovich – engineer-designer of the first category, JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus". E-mail: POLUS@ONLINE.TOMSK.NET

Ermoshkin Yury Mihailovich – Cand. Sc., head of a laboratory, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: erm@iss-reshetnev.ru.

Fedorov Leonid Yur'evich – postgraduate student, junior researcher, Siberian Federal University. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Filyushina Elena Vladimirovna – Docent of Department of Information and Economic systems, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: filyushina@sibsau.ru.

Girn Aleksei Vasilyevich – Cand. Sc., Docent, Docent of Department of Flying Vehicles, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: girn007@gmail.com.

Gomonova Olga Valer'evna – Cand. Sc., Docent of Higher Methimatics Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: gomonova@mail.ru.

Ivanov Andrey Vladimirovich – Dr. Sc., chief designer, JSC "Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiky". E-mail: abel-cadb@yandex.ru.

Karpov Igor Vasil'evich – Cand. Sc., senior researcher, Siberian Federal University. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Kazakovtsev Lev Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent, Docent of Information Economic System Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: levk@bk.ru.

Kharkov Anton Mikhailovich – Cand. Sc., senior lecturer of Physics Department, junior researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: khark.anton@mail.ru

Klyuchnikov Aleksandr Vassilyevich – Cand. Sc., head of the designer's department of Federal State Unitary Enterprise "RFNC-VNIITF named after academician E. I. Zababakhin". E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru.

Kochegurov Alexander Ivanovich – Cand. Sc., Docent, Department of Applied Mathematics, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru.

Kochev Yury Vladimirovich – Cand. Sc., head of a group, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: koch@iss-reshetnev.ru.

Kovaleva Evgenia Andreevna – postgraduate student, assistant researcher, Siberian Federal University. E-mail: kovaleva.evgeniya1991@mail.ru.

Kretinin Vasily Vasilevich – Master's Degree student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: rob@iph.krasn.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor Chief research officer, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kuznetsov Petr Anatol'evich – assistant, Siberian State Technological University. E-mail: forubox@yandex.ru.

Krylov Yuriy Valerievich – Design Engineer of JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: krylov_yuriy@inbox.ru.

Kuklin Artem Valentinovich – postgraduate student, research engineer, Siberian Federal University. E-mail: artem.icm@gmail.com.

Kuzubov Alexander Alexandrovich – Cand. Sc., Docent, Siberian Federal University. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Laevski Viktor Evgenjevich (V. Geringer) – Cand. Sc., Head of Laboratories of "Automotive Electronics" and "Energy @ Environmental Engineering", Baden-Württemberg Cooperative State University. E-mail: geringer@DHBW-Ravensburg.de.

Latushkina Larisa Leonidovna – Senior Lecturer, Khakassia Technical Institute, a branch of Siberian Federal University. E-mail: Latush2003@mail.ru.

Lepeshev Anatoly Aleksandrovich – Dr. Sc., lead researcher, Siberian Federal University. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Lihachev Maxim Vasilyevich – lead engineer, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: max_kzk@catiaforum.ru.

Mikhaleva Natalia Sergeevna – junior research fellow, Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: natasha.eliseeva90@gmail.com.

Miheev Anatolii Egorovich – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Flying Vehicles, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: michla@mail.ru.

Mihov Eugene Dmitrievich – engineer, Siberian Federal University. E-mail: edmihov@mail.ru.

Morozov Egor Aleksandrovich – head of Information Technology Department, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: morozov@iss-reshetnev.ru.

Onisiforova Ekaterina Valerevna – Cand. Sc., Docent, Department of International Personnel and Project Management, International Business School, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kath.gasenko@ya.ru.

Piskazhova Tatiana Valerievna – Dr. Sc., Head of the Department "Automation of the production processes and heat transfer engineering in metallurgy", Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: piskazhova@ya.ru.

Popov Zakhar Ivanovich – Cand. Sc., research fellow, Institute of Physics, SB RAS. E-mail: zipcool@bk.ru.

Ravodina Daria Vladimirovna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru.

Romanova Oksana Borisovna – Cand. Sc., senior researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: rob@iph.krasn.ru.

Safonov Konstantin Vladimirovich – Dr. Sc., Head of Department of Applied Mathematics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: safonovkv@ rambler.ru.

Senashov Sergei Ivanovich – Dr. Sc., professor, Head of Department of Information and Economic Systems, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sen@sibsau.ru.

Shaihadinov Aleksandr Anatol'evich – Cand. Sc., senior researcher, Siberian Federal Uneiversity. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Shostak Svetlana Alexandrovna – student, Siberian Federal University. E-mail: sa.shostakk@gmail.com.

Sidelnikov Andrei Sergeevich – assistant of Foundry Engineering Department, Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: andsidelnikov@yandex.ru.

Sidelnikov Sergei Borisovich – Dr. Sc., professor, Head of Metal Forming Department, Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Sidorova Tatyana Valerevna – Cand. Sc., Docent, Department of Applied Mathematics and Computer Security, Institute of Space and Informatics Technologies, Siberian Federal University. E-mail: stany6@yandex.ru.

Sitnikov Maxim Nikolaevich – postgraduate student, assistant of Physics Department, engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kineru@mail.ru.

Sumina Ekaterina Vladimirovna – Cand. Sc., Docent, Docent of International Business Department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sumina@sibsau.ru.

Taygin Vitaly Borisovich – Head of sector of JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: taygin87@mail.ru.

Testoedov Nikolai Alekseevich – Dr. Sc., Associate Member of RAS, Professor, Director General of JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Tovstonoshenko Valentina Nikolaevna – Docent, Department of Logistics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: teachervalua@mail.ru.

Trofimchuk Denis Aleksandrovich – senior engineer, JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: trofden@mail.ru.

Tronin Oleg Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent of Radioelectronics Systems Department, Institute of Engineering Physics and Radioelecronics, Siberian Federal University. E-mail: toa12@yandex.ru.

Trushkina Tatiana Vladimirovna – industrial engineer, JSC "Krasnoyarsk Machine Building Plant". E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Turchinivich Anna Olegovna – Lecturer, Department of Engineering Issues in Ecology, Aircraft Faculty, Novosibirsk State Technical University. E-mail: golubevaa@ngs.ru.

Ushakov Anatoly Vasilievich – Cand. Sc., Docent, Department of Modern Natural Science, Institute for the Humanities, Siberian Federal University. E-mail: ushackov@mail.ru.

Visotin Maxim Alexandrovich – postgraduate student, Siberian Federal University. E-mail: cianol@mail.ru.

Yakimov Eugeny Nikolaevich – chief designer; JSC "Information Satellite System" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: yen@iss-reshetnev.ru.

Yakivyuk Pavel Nikolaevich – postgraduate student of Department of Automation of Technological Processes and Heating in Metallurgy, Institute of Nonferrous Metals and Materials, Siberian Federal University. E-mail: PavelYakivyuk@yandex.ru.

Zyablikov Dmitriy Valeryevich – Cand. Sc., Docent, Department of theoretical foundations of Economics, Siberian Federal University. E-mail: rewtyu@mail.ru.

Zykova Tatyana Viktorovna – Cand. Sc., Docent, Department of Applied Mathematics and Computer Security, Institute of Space and Informatics Technologies, Siberian Federal University. E-mail: zykovatv@mail.ru.