ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева

Том 16, № 4

Красноярск 2015

ВЕСТНИК

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

Том 16, № 4

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

Антамошкин А. Н. , доктор технических наук, профессор
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
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 4

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

Antamoshkin A. N. , Dr.Sc., Professor
Aplesnin S. S., Dr.Sc., Professor
Golovenkin E. N., Dr.Sc., Professor
Erygin Y. V., Dr.Sc., Professor
Laptenok V. D., 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 25.12.2015. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 34,0.
Уч.-изд. л. 41,9. Тираж 1000 экз. Заказ 87/237. С 219/15.
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: 20.01.2016. Свободная цена

Editor O. A. Plekhova
Editor (*English Language*) S. G. Efa
Layout original O. V. Bulatnikova
Signed (for printing): 25.12.2015. Format 70×108/16.
Offset Paper. Print flat. 34,0. Published sheets 41,9.
1000 copies. Order 87/237. C 219/15.
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: 20.01.2016. Free price

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Антамошкина О. А., Корец М. А. Мониторинг состояния растительного покрова зоны охвата мачты ZOTTO по данным дистанционного зондирования 814

Иванов И. А., Сопов Е. А., Панфилов И. А. Многокритериальный подход к проектированию ансамбля нейросетевых классификаторов с отбором информативных признаков для решения задачи распознавания эмоций 819

Пермяков Г. Л., Трушников Д. Н., Беленький В. Я., Ольшанская Т. В. Численное моделирование процесса электронно-лучевой сварки с продольной осцилляцией луча на основе экспериментально определенной формы канала проплавления 828

Сопов Е. А., Аплеснин С. С. Самоконфигурируемый ансамбль генетических алгоритмов для решения задач мультимодальной оптимизации 833

Становов В. В., Бежитский С. С., Бежитская Е. А., Попов Е. А. Многоагентный алгоритм проектирования баз нечетких правил для задач классификации 842

Тестоедов Н. А., Кочура С. Г., Максимов И. А. Система мониторинга уровней воздействия космической среды на космические аппараты разработки АО «Информационные спутниковые системы» 849

Федотов Д. В., Попов Е. А., Охорзин В. А. Оптимизация структуры сверточной нейронной сети с помощью самоконфигурируемого эволюционного алгоритма в одной задаче идентификации 857

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Башков И. В., Ермолаев Р. А., Кузнецов А. Б., Михеев А. Е., Гирн А. В. Модель влагопоглощения материалов, применяемых при производстве антенн космических аппаратов 864

Бойко С. Н., Исаев А. В., Косякин С. В., Кухаренко А. С., Яскин Ю. С. Антенные модули аппаратуры потребителей ГНСС: инновационные решения 868

Двирный В. В., Елфимова М. В., Двирный Г. В., Пацкова Е. Г. Использование прикладного потенциала теории технической совместимости в космической технике и аварийно-спасательных средствах 875

Зыков В. М., Максимов Ю. В., Максимов И. А., Кочура С. Г., Иванов В. В., Пацков А. В. Испытания электронных компонентов из лётных партий к дозовым эффектам для гарантии стойкости бортовой аппаратуры космических аппаратов 881

Карцан И. Н., Тимохович А. С., Карцан Т. И., Дмитриев Д. Д. Определение навигационных параметров объектов в условиях действия помех различного происхождения 891

Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В., Хоменко И. И., Алякрецкий Р. В. Влияние деструктивных факторов окружающей среды на свойства радиоотражающих покрытий рефлекторов антенн из полимерных композиционных материалов 898

Тимушев С. Ф., Клименко Д. В. Расчет пульсаций давления в отводе шнекоцентробежного насоса акустико-вихревым методом 907

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Разработка технологии частичного отверждения тонкостенных оболочек при создании конструкций из полимерных композиционных материалов 918

Гофман П. М., Колесник В. В., Ковалев Д. И., Брезицкая В. В., Першакова К. К. Отечественные удаленные устройства связи с объектом для распределенных автоматизированных систем управления технологическим процессом 924

Захаров Ю. В., Власов А. Ю., Авакумов Р. В. Перемагничивание слоистого нанокомпозита FM/NM/FM/AFM с одноосной анизотропией 929

Карпов И. В., Ушаков А. В., Лепешев А. А., Федоров Л. Ю., Шайхадинов А. А. Исследование трибологических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного в плазме 935

Кузнецов П. А., Ковалев Д. И., Лосев В. В., Калинин А. О. К вопросу о состояниях работоспособности структурно-сложных систем автоматического управления 941

Куприянова О. А., Власов А. Ю., Пасечник К. А., Арзамаскина А. М.
Определение комплексного показателя для оценки уровня качества рефлектора 946
Михеев А. Е., Ивасев С. С., Гирн А. В., Драганюк М. Н., Трушкина Т. В.
Усовершенствование конструкции распылительного устройства
электрометаллизатора ЭМ-17 952
Потылицына Е. Н., Тасейко О. В., Сугак Е. В. Оценка влияния загрязнения воздуха
предприятиями машиностроения на здоровье населения 958
Телегин С. В., Саунин В. Н., Драганюк О. Н., Драганюк М. Н.
Гетерогенный радиационно-защитный экран для космических аппаратов 969
Удод Л. В., Ситников М. Н. Влияние катионного замещения на полиморфные переходы
в пиростаннате висмута $Bi_2Sn_2O_7$ 975
Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А. Механизмы ионизации в катодном пятне
вакуумной дуги 983

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Беляков Г. П., Карачёва Г. А. Реструктуризация предприятий ракетно-космической
промышленности в условиях создания корпоративной структуры 992
Белякова Г. Я., Аврамчикова Н. Т., Проскурнин С. Д. Организационные формы
управления инновационным развитием локальных административно-территориальных
образований (на примере зато г. Железногорск Красноярского края) 997
Белякова Е. В., Прокопович Д. А., Рыжая А. А., Гильц Н. Е. Логистический подход
к технологическому развитию промышленного комплекса региона 1007
Воейкова О. Б., Лячин В. И. Категориальное определение инновационного пространства 1014
Зеленская Т. В., Кузнецов А. А., Медведев А. В. Инструменты оценки и планирования
интеллектуального капитала, стимулирующие переход из латентного состояния
в экономический оборот 1022
Куимов В. В., Куимов А. О., Толстой Д. А. Региональные технологические платформы
в инновационном развитии территории 1029
Лукьянова А. А., Кононова Е. С., Лютых Ю. А. Пути повышения эффективности
механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона
(на примере Красноярского края) 1038
Михин П. О., Антамошкин А. Н., Антамошкина Е. А. Концептуальный подход
и методика управления рисками инновационной деятельности на предприятиях космической отрасли 1044
Сенашов С. И., Рудь С. Н. Совершенствование системы таможенного контроля товаров,
содержащих объекты интеллектуальной собственности 1049
Сердюк Р. С., Ерыгина Л. В. Сбалансированное развитие инновационной и инвестиционной
деятельности на предприятиях ракетно-космической промышленности 1060
Смородинов Р. В., Смородинова Н. И. Оценка эффективности инновационной деятельности
предприятий ракетно-космической промышленности 1067
Таюрский А. И., Левко В. А. Роль дуального профессионального образования
в инновационном развитии промышленного предприятия 1071
Тестоедов Н. А., Крушенко Г. Г., Морозов Е. А., Двирный В. В., Катык К. В.
Реализация инновационных разработок на ряде аэрокосмических предприятий 1078
Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В. Принципы формирования сбалансированных стратегий
в ракетно-космической отрасли России в период ее реформирования 1082

Сведения об авторах 1089

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Antamoshkina O. A., Korets M. A. Vegetation monitoring within the ZOTTO tall tower coverage area using remote sensing data 814
Ivanov I. A., Sopov E. A., Panfilov I. A. Multi-objective approach for designing ensemble of neurals network classifiers with feature selection for emotion recognition problem 819
Permyakov G. L., Trushnikov D. N., Belenkiy V. Ya., Olshanskaya T. V. Numerical simulation of electron-beam welding with a longitudinal oscillation of the beam based on the experimental determination of the keyhole form 828
Sopov E. A., Aplesnin S. S. Self-configuring ensemble of genetic algorithms for multimodal optimization problems 833
Stanovov V. V., Bezhitskii S. S., Bezhitskaya E. A., Popov E. A. Multiagent algorithm for fuzzy rule bases design for classification problem 842
Testoedov N. A., Kochura S. G., Maximov I. A. System for monitoring the levels of space environment exposure experienced by satellites developed by “Information satellite systems” company 849
Fedotov D. V., Popov E. A., Okhorzin V. A. Optimisation of convolutional neural network structure with self-configuring evolutionary algorithm in one identification problem 857

PART 2. AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

Bashkov I. V., Ermolaev R. A., Kuznetsov A. B., Miheev A. E., Girn A. V. Model of moisture absorption materials used in the manufacture of spacecraft antennas 864
Boyko S. N., Isaev A. V., Kosyakin S. V., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S. Antenna modules of GNSS user equipment: innovative approaches 868
Dvirniy V. V., Elfimova M. V., Dvirniy G. V., Patskova E. G. Practical potential of technical compatibility theory at space engineering and rescue equipment 875
Zykov V. M., Maximov Yu. V., Maximov I. A., Kochura S. G., Ivanov V. V., Patskov A. V. Testing electronic parts from flight lots on dose effects for the hardness guarantee of spacecraft onboard equipment 881
Kartsan I. N., Timokhovitch A. S., Kartsan T. I., Dmitriev D. D. Determining navigation parameters of objects under the action of interference of various origins 891
Miheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V., Khomenko I. I., Alyakretskiy R. V. Destructive effects of environmental factors on the properties of radio reflective coating for antenna reflectors from the polymeric composite materials 898
Timushev S. F., Klimenko D. V. Computation of pressure pulsations in the outlet devise of screw-centrifugal pump with acoustic-vortex method 907

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIAL SCIENCE

Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. Development of the technology of partial solidification of thin-walled shells when creating designs from polymeric composite materials 918
Gofman P. M., Kolesnik V. V., Kovalev D. I., Brezitskaya V. V., Pershakova Ch. K. Domestic remote devices for communication with an object for distributed automated process control systems 924
Zakharov Yu. V., Vlasov A. Yu., Avakumov R. V. Magnetization [reversal] of layered nanocomposite FM/NM/FM/AFM with uniaxial anisotropy 929
Karpov I. V., Ushakov A. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Shaihadinov A. A. Study of tribological properties of plasma-modified UHMWPE 935
Kuznetsov P. A., Kovalev D. I., Losev V. V., Kalinin A. O. To the question about the states of workability for automatic control systems with complicated structure 941
Kupriyanova O. A., Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Arzamaskina A. M. Determination of the complex index for reflector quality level assessment 946
Miheev A. E., Ivasev S. S., Girn A. V., Draganyuk M. N., Trushkina T. V. Design improvements for spraying device-gun EM-17 952
Potylitsyna E. N., Taseiko O. V., Sugak E. V. Assessment of influence of air pollution produced by engineering enterprises on human health 958

Telegin S. V., Saunin V. N., Draganyuk O. N., Draganyuk M. N. The heterogeneous radiation shield for spacecrafts 969
Udod L. V., Sitnikov M. N. The effect of cation substitution on polymorphic transitions in bismuth pyrostannate $Bi_2Sn_2O_7$ 975
Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A. Modeling of metal vapor ionization processes in the cathode spot of a vacuum arc 983

PART 4. ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

Belyakov G. P., Karacheva G. A. Restructuring of enterprises of rocket and space industry in terms of establishing a corporate structure 992
Belyakova G. Y., Avramchikova N. T., Proskurnin S. D. Organizational forms of management of innovative development of local administrative-territorial formations (using the example of CATU Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region) 997
Belyakova E. V., Prokopovich D. A., Ryzhaya A. A., Gilts N. E. Logistic approach to the technological development of regional industrial complex 1007
Voeykova O. B., Lyachin V. I. Categorical definition of innovative space 1014
Zelenskaya T. V., Kuznetsov A. A., Medvedev A. V. Intellectual capital assessment and planning tools, stimulating transition from a latent state to the economic turnover 1022
Kuimov V. V., Kuimov A. O., Tolstoy D. A. Regional technology platforms of the innovative development of territories 1029
Lukyanova A. A., Kononova E. S., Lyutykh Y. A. Ways of increase of efficiency of the mechanism of state regulation of socio-economic development of region (on the example of Krasnoyarsk region) 1038
Mikhin P. O., Antamoshkin A. N., Antamoshkina E. A. Conceptional approach and management technique to manage risks of innovations in the space industry 1044
Senashov S. I., Rud S. N. Improvement of intellectual property customs control system 1049
Serdyuk R. S., Erygina L. V. Balanced development of innovation and investment in the rocket and space industry 1060
Smorodinov R. V., Smorodinova N. I. Evaluation of innovative activity of the aerospace industry enterprise 1067
Tayurskii A. I., Levko V. A. The role of dually professional education for innovative development of industrial enterprises 1071
Testoedov N. A., Krushenko G. G., Morozov E. A., Dvirniy V. V., Katyk K. V. Implementation of innovative developments at a number of aerospace companies 1078
Firulev O. V., Erygin Y. V. The principles of forming of balanced strategies in the Russian rocket and space industry during the period of its reform 1082

Information about the authors 1094

Раздел
Part
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

УДК 528.854

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 814–818

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЗОНЫ ОХВАТА МАЧТЫ ZOTTO ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О. А. Антамошкина[1, 2], М. А. Корец[2]

[1]Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28
[2]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: sloa@mail.ru

Рассмотрены вопросы классификации спутниковых изображений с целью выделения основных типов лесных экосистем, а также решение задачи многолетнего мониторинга состояния выделенных экосистем на основе спутниковых снимков среднего пространственного разрешения и ежедневных данных космического мониторинга действующих пожаров. Районом исследования данной работы является 100-километровая зона охвата мачты ZOTTO, установленная в районе пос. Зотино Красноярского края. Исследуемая территория расположена в среднетаежной подзоне Западной Сибири, представлена левым и правым берегами р. Енисея.

На основе данных наземных исследований, полученных за последние пятнадцать лет, проведена классификация спутниковых изображений Landsat методом максимального правдоподобия. В результате выделено 10 агрегированных классов земной поверхности и составлена тематическая карта исследуемых территорий.

Оперативный спутниковый мониторинг и анализ пространственной информации о состоянии экосистем в 100-километровой зоне охвата мачты ZOTTO дает возможность отследить динамику нарушенности лесов пожарами и рубками за длительный временной период и оценить изменения лесных экосистем района исследования. Получены данные о количестве и площади пожарищ, выявленных на исследуемой территории за 2000–2014 годы. Проведенные расчёты показывают, что за изучаемый период огнем пройдено более 25 % исследуемой территории. Отмечено, что лесные пожары оказывают значительное влияние на перераспределение классов подстилающей поверхности. В ходе проведенных исследований выявлено, что под воздействием пожаров площадь всех типов растительных экосистем значительно сократилась, тогда как промышленная заготовка древесины не вносит существенного вклада в общую картину нарушенности территории.

Результаты, полученные в нашей работе, свидетельствуют о наиболее высокой горимости лишайниковых типов леса на изучаемой территории, что согласуется с литературными данными и обусловлено, очевидно, их высокой природной пожарной опасностью. Наименьший ущерб пожары нанесли болотным экосистемам, что объясняется повышенным содержанием влаги и наличием большого количества пожарных разрывов в виде открытой воды.

Ключевые слова: спутниковые изображения, автоматическая классификация, лесные пожары, мониторинг лесных экосистем.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 814–818

VEGETATION MONITORING WITHIN THE ZOTTO TALL TOWER COVERAGE AREA USING REMOTE SENSING DATA

O. A. Antamoshkina[1, 2], M. A. Korets[2]

[1]V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: sloa@mail.ru

The article discusses the methods of satellite image classification to determine general types of forest ecosystems, as well as the long-term monitoring of ecosystems changes using satellite imagery of medium spatial resolution and the daily data of space monitoring of active fires. The area of interest of this work is 100 km footprint of the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO), located near Zotino settlement, Krasnoyarsk region. The study area is located in the middle taiga subzone of Western Siberia, and presented by the left and right banks of the Yenisei river.

For Landsat satellite imagery supervised classification by the maximum likelihood method was made using ground-based studies over the last fifteen years. The results are the identification of the 10 aggregated classes of land surface and composition of the study area thematic map.

Operational satellite monitoring and analysis of spatial information about ecosystem in the 100-kilometer footprint of the ZOTTO tall tower allows to monitor the dynamics of forest disturbance by fire and logging over a long time period and to estimate changes in forest ecosystems of the study area. Data on the number and area of fires detected in the study region for the 2000–2014 have been received in the work. Calculations show that active fires have burned more than a quarter of the footprint area over the study period. Fires have a significant impact on the redistribution of classes of land surface. The area of all types of plant ecosystems declined dramatically under the influence of fires, whereas industrial logging does not have a serious impact on it.

The results obtained in our work indicate the highest occurrence of fires for lichen forest types within study region, probably due to their high natural fire danger, which is consistent with other studies. The least damage the fire caused to the wetland ecosystem due to high content of moisture and the presence of a large number of fire breaks in the form of open water.

Keywords: satellite images, supervised classification, forest fires, monitoring of forest ecosystems.

Введение. В настоящее время принято считать, что одним из главных факторов потепления климата Земли является увеличивающаяся концентрация в атмосфере парниковых газов, в том числе углекислого газа (CO_2). Экосистемы Сибири, составляющие около 1/5 мировой лесопокрытой площади, являются наиболее мощным резервуаром углерода и играют важную роль в глобальном цикле углерода, влияя на климат Земли [1].

Лесные пожары, являясь неотъемлемым фактором динамики лесных экосистем, вносят существенный вклад в эмиссии углерода в атмосферу. В последние несколько десятилетий частота возникновения пожаров в бореальных лесах возросла [2]. Ряд исследований показывает возможность дальнейшего увеличения частоты пожаров в условиях глобального изменения климата [3–5].

Таким образом, важной задачей является оценка изменений, происходящих в составе атмосферы, вследствие увеличения эмиссий CO_2, вызванных лесными пожарами.

Одним из способов решения данной задачи является интеграция данных атмосферных исследований, наземных наблюдений и спутниковых данных. Представленная ниже работа является частью исследования, в котором выполняется сопряженный анализ информации о состоянии нижней части слоя атмосферы, получаемой на измерительной мачте международной обсерватории ZOTTO, данных наземных обследований, выполненных в зоне охвата мачты, и данных о состоянии подстилающей поверхности, полученных на основании спутниковой съемки.

В работе рассматриваются вопросы классификации спутниковых изображений с целью выделения основных типов подстилающей поверхности, имеющих близкие характеристики по запасу углерода в фитомассе, и анализа многолетней динамики состояния лесных экосистем территории исследования.

Район исследования. Выбор района исследования данной работы базируется на местоположении измерительной вышки (высота 302 м) Международной обсерватории ZOTTO [6], которая установлена в районе пос. Зотино (Красноярский край, 60º48′ с. ш., 89º21′ в. д.). На обсерватории ведутся круглосуточные измерения концентраций парниковых газов, радиационных и метеорологических параметров в приземных слоях атмосферы.

Выделение основных типов подстилающей поверхности и оценка динамики их состояния проводилась в 100-километровой зоне охвата мачты ZOTTO. Исследуемая территория расположена в среднетаежной подзоне Западной Сибири, представлена левым и правым берегами р. Енисея. Основными факторами нарушения данной территории являются лесные пожары и рубка леса.

Классификация спутниковых изображений. С целью выделения основных типов подстилающей поверхности на территории исследования использованы мультиспектральные спутниковые снимки LandsatETM+, полученные в течение вегетационного периода 2000 года. Используемые снимки Landsat прошли стандартную предварительную обработку, включающую процедуры радиометрической и геометрической коррекции систематических искажений сенсора. Классификация спутниковых изображений для картографирования типов земной поверхности является одной из основных областей применения данных дистанционного зондирования и широко применяется во всем мире [7]. Совместное использование спутниковых и наземных данных повышает точность классификации и позволяет более полно анализировать пространственное распределение типов земной поверхности [8].

В нашей работе была проведена управляемая автоматическая классификация спутниковых изображений методом максимального правдоподобия. Метод максимального правдоподобия является наиболее часто используемым и наиболее точным для такого рода задач [9]. В качестве обучающей выборки использованы наземные данные, полученные в ходе полевых работ, проводимых на исследуемой территории в 2000–2014 годах. Наземные данные состоят из 350 постоянных пробных площадей, заложенных на наиболее репрезентативных участках древостоев, для которых при использовании методов перечислительной таксации подробно описаны характеристики лесных насаждений и рассчитано содержание углерода в стволовой древесине и крупных древесных остатках. Вся наземная информация хранится в информационной системе Forest, включающей себя СУБД и ГИС-систему, и доступна удаленно по адресу http://forest.sfukras.ru [10; 11].

Общая площадь территории исследования оценивается в 3140 тыс. га. В результате анализа спутниковой информации на территории охвата высотной мачты выделено 10 агрегированных классов земной поверхности. На основе этих классов была получена тематическая карта наземного покрова изучаемого района. При этом установлено, что покрытая лесом площадь составляет около 76 % территории исследования. На 2000-е годы среди классов с лесной растительностью доминирующее положение по площади занимают темнохвойные насаждения (ельники, пихтачи, кедрачи) – 48 %. На лиственные насаждения (березняки и осинники), сформированные на вырубках и гарях, приходится 12 % площади. Около 16 % территории занимают сосновые биогеоценозы, представленные сосняками лишайниковыми и зеленомошными. Болотные экосистемы занимают 11 % территории. Площадь свежих вырубок и гарей составила 3 и 5 % соответственно.

Оценка состояния лесных экосистем. Спутниковые данные среднего пространственного разрешения широко используются для мониторинга состояния лесных экосистем [12; 13]. В нашей работе в целях изучения многолетних изменений растительного покрова изучаемой территории применялись данные LandsatETM+, TM и OLI. Было использовано более 20 сцен, полученных со спутников серии Landsat в период с 2000 по 2014 гг. Характерной чертой программы Landsat является наследование спектральных диапазонов, в которых ведется съемка, что обеспечивает преемственность и совместимость данных, полученных разными спутниками серии Landsat в течение всего периода действия программы.

Дешифрирование участков леса, погибших от рубок и лесных пожаров, основывалось на значениях спектральной яркости подстилающей поверхности, полученных по информации спутника Landsat. Как известно, изменение физиологического состояния растений ведет к изменению их спектральных характеристик [14]. Это происходит за счет снижения поглощения солнечного света хлорофиллом и, как следствие, увеличения коэффициента отражения в видимой области электромагнитного спектра, а также вследствие повреждения тканей листьев, ведущего к снижению коэффициента отражения в ближней инфракрасной области [15; 16]. Данные свойства растительности применяются при дешифрировании спутниковых изображений.

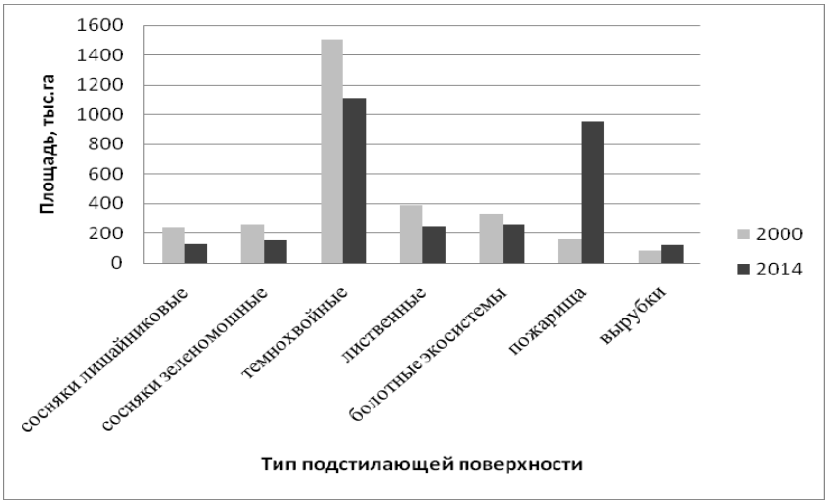
При дешифрировании участков леса, пройденных огнем, использованы следующие критерии: спектральные характеристики в видимом и инфракрасном диапазонах на послепожарных снимках Landsat; пространственные признаки (наличие резко очерченной границы); наличие для участка в архиве Красноярского центра космического мониторинга полигонов действующих пожаров (термоточек). Полигоны активных пожаров вычисляются ежедневно в течение всего пожароопасного сезона по спутниковым данным Terra, Aqua/Modis. Для детектирования активных пожаров в Красноярском центре космического мониторинга используется пороговый алгоритм Кауфмана, основанный на особенностях излучения пламени пожара в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне [17].

В таблице представлены данные о количестве и площади пожарищ, выявленных на исследуемой территории за 2000–2014 годы. Как видно из таблицы, суммарная площадь, пройденная огнем, составила 852 560,28 га. Некоторые участки при этом были пройдены огнем более одного раза. Путем объединения полигонов пожарищ, полученных за все годы, в один слой мы исключили дублирование площадей пожарищ и получили общую площадь, пройденную огнем за 2000–2014 годы, которая составила 830 037,61 га. Таким образом, за последние 15 лет огнем пройдено около 26 % исследуемой территории.

Согласно полученным данным, за исследуемый период было отмечено 2 пика активной горимости – в 2006 и 2012 гг. За пожароопасный сезон 2006 года огнем пройдено более 2 % исследуемой территории, за сезон 2012 г. – около 23 %. По состоянию на 2014 г. пожары внесли значительный вклад в структуру лесного фонда и привели к существенному изменению площадей, занимаемых растительными экосистемами на территории исследования, по сравнению с 2000 г. (см. рисунок).

Количество и площадь пожарищ в 2000–2014 годах

Год	Площадь пожарищ, га	Количество пожаров
2000	8 025,12	3
2001	702,00	1
2002	0	–
2003	2 133,83	3
2004	6 606,16	8
2005	1 610,27	4
2006	73 412,47	22
2007	467,50	2
2008	653,60	1
2009	0	–
2010	0	–
2011	18 271,99	18
2012	711 063,53	33
2013	23 708,90	8
2014	5 904,91	9
Итого за 2000–2014	852 560,28	112



Изменение площадей, занимаемых растительными экосистемами на территории исследования, в 2000–2014 годах

Как видно из рисунка, площадь пожарищ исследуемой территории значительно увеличилась в период с 2000 по 2014 годы и составила около 980 тыс. га. Площадь вырубок увеличилась с 82 до 117 тыс. га. Площадь всех типов растительных экосистем сократилась: сосняков лишайниковых с 239 до 123 тыс. га; сосняков зеленомошных с 260 до 153 тыс. га; темнохвойных насаждений с 1502 до 1094 тыс. га; лиственных насаждений с 386 до 248 тыс. га; болотных экосистем с 328 до 255 тыс. га. Значительней всего уменьшилась площадь темнохвойных насаждений, преобладающих на данной территории.

Заключение. Оперативный спутниковый мониторинг и анализ пространственной информации о состоянии экосистем в 100-километровой зоне охвата мачты ZOTTO дает возможность отследить динамику нарушенности лесов пожарами и рубками за длительный временной период и оценить изменения лесных экосистем района исследования. В результате проведенных исследований для изучаемой территории было выделено 10 основных классов подстилающей поверхности. По спутниковым снимкам Landsat проведен многолетний анализ нарушенности растительных экосистем пожарами и вырубками. Установлено, что площадь пожарищ за изучаемый период (с 2000 по 2014 годы) значительно возросла и в настоящее время составляет около 30 % территории. Промышленная заготовка древесины не вносит существенного вклада в общую картину нарушенности территории, и общая площадь вырубок в настоящий момент составляет порядка 4 %. Площадь всех типов растительных экосистем значительно сократилась. При этом сосняки лишайниковые потеряли 49 % своей первоначальной площади, сосняки зеленомошные – 41 %, лиственные насаждения – 36 %, темнохвойные насаждения – 27 %, болотные экосистемы – 22 %.

Известно, что на горимость лесов оказывает влияние ряд факторов, таких как тип леса, возраст насаждений, количество влаги, скорость ветра и т. д. [18; 19]. Результаты, полученные в нашей работе, свидетельствуют о наиболее высокой горимости лишайниковых типов леса на изучаемой территории, что согласуется с литературными данными и обусловлено, очевидно, их высокой природной пожарной опасностью. Наименьший ущерб пожары нанесли болотным экосистемам, что объясняется повышенным содержанием влаги и наличием большого количества пожарных разрывов в виде открытой воды.

Благодарности. Работа поддержана грантом РНФ № 14-24-00113, а также грантом РФФИ № 13-05-41506.

Acknowledgments. This work was supported by grant of RSF № 14-24-00113, as well as a grant from the RFBR № 13-05-41506.

Библиографические ссылки

1. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России (аналитический обзор) / А. С. Исаев [и др.] // Центр экологической политики России. М., 1995. 156 с.

2. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests / E. S. Kasischke [et al.] // Ecological Applications. 1995. № 5(2). P. 437–451.

3. Krawchuk M. A., Cumming S. G., Flannigan M. D. Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest // Climatic Change. 2009. Vol. 92. P. 83–97.

4. Forest fires and climate change in the 21st century / M. D. Flannigan [et al.] // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2005, Vol. 11(4), P. 847–859. DOI: 10.1007/sl 1027-005-9020-7.

5. Effects of Fire and Climate on Successions and Structural Changes in The Siberian Boreal Forest / V. V. Furyaev [et al.] // Eurasian J. For. Res. 2001. № 2. P. 1–15.

6. The Zotino Tall Tower Observatory (Zotto): Quantifying Large Scale Biogeochemical Changes in Central Siberia / M. Heimann [et al.] // Nova ActaLeopoldina NF. 2014. № 117(399), P. 51–64.

7. Global Remote Sensing Research Trends during 1991–2010: A Bibliometric Analysis / Y. H. Zhuang [et al.] // Scientometrics. 2013. № 96. P. 203–219. DOI: 10.1007/s11192-012-0918-z.

8. Developments in the validation of satellitesensor products for the study of the land surface / C. Justice, [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. P. 3383–3390.

9. Meta-discoveries from a synthesis of satellite-based land-cover mapping research / Le Yu [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. P. 4573–4588.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014618974 от 04.09.2014 г. / О. А. Антамошкина, Н. В. Трофимова, С. В. Верховец.

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620947 от 02.07.2014 г. / О. А. Антамошкина, Н. В. Трофимова, С. В. Верховец, Н. Н. Кошурникова, А. В. Климченко.

12. Спутниковое зондирование Земли – уникальный инструмент мониторинга лесов России / А. С. Исаев [и др.] // Вестник Российской академии наук. 2014. Т. 84, № 12. С. 1073.

13. Townshend Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 / Do-Hyung Kim [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 155. P. 178–193.

14. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш. М. Дейвис [и др.]. М. : Недра, 1983. 415 с.

15. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М. : Мир, 1988. 350 с.

16. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery / White J. D. [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 1996. № 6. P. 125–136.

17. Yoram Kaufman, Chris Justice. Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS (Version 2.2). 1998. (EOS ID# 2741).

18. Волокитина А. В., Софронов М. А. Классификация растительных горючих материалов // Лесоведение. 1996. № 3. С. 38–44.

19. Курбатский Н. П. Пожары тайги, закономерности их возникновения и развития : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 1964. 54 с.

References

1. Isaev A. S., Korovin G. N., Sukhikh V. I., Titov S. P., Utkin A. I., Golub A. A., Zamolodchikov D. G., Pryazhnikov A. A. *Ecologicheskie problemy poglosheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya I lesorazvedeniya v Rossii (analytychesky obzor)* [Environmental problems in the absorption of carbon dioxide through reforestation and afforestation in Russia (analytic review)]. Moscow, Tsentr ecologicheskoy politiki Rossii Publ., 1995, 156 p. (In Russ.).

2. Kasischke E. S., Christensen N. L., Jr. and B. J. Stocks. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests. 1995, Ecol. Appl. 5, P. 437–451.

3. Krawchuk M. A., Cumming S. G., Flannigan M. D. Predicted changes in fire weather suggest increases in lightning fire initiation and future area burned in the mixedwood boreal forest. *Climatic Change*, 2009, Vol. 92, P. 83–97.

4. Flannigan M. D., Amiro B. D., Logan K. A., Stocks B. J., Wotton B. M. Forest fires and climate change in the 21st century. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, Vol. 11(4), P. 847–859. DOI: 10.1007/sl 1027-005-9020-7.

5. Furyaev V. V., Vaganov E. A., Tchebakova N. M., Valendik E. N. Effects of Fire and Climate on Successions and Structural Changes in the Siberian Boreal Forest. *Eur. J. Forest Res*., 2001, No. 2, P. 1–15.

6. Heimann M., Schulze E. D., Winderlich J. et al. The Zotino Tall Tower Observatory (Zotto): Quantifying Large Scale Biogeochemical Changes in Central Siberia. *Nova ActaLeopoldina NF*, 2014, Vol. 117(399), P. 51–64.

7. Zhuang Y. H., Liu X. J., Nguyen T., He Q. Q., Hong S. Global Remote Sensing Research Trends during 1991–2010: A Bibliometric Analysis. *Scientometrics*, 2013, No. 96, P. 203–219. DOI: 10.1007/s11192-012-0918-z.

8. Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J. and Baret F. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, P. 3383–3390.

9. Le Yu, Lu Liang, Jie Wang et al. Meta-discoveries from a synthesis of satellite-based land-cover mapping research. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, P. 4573–4588.

10. Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Verkhovets S. V. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM.* [The certificate of state registration of computer program]. No. 2014618974, 2014.

11. Antamoshkina O. A., Trofimova N. V., Verkhovets S. V., Koshurnikova N. N., Klimchenko A. V. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh* [The certificate of state registration of database]. No. 2014620947, 2014.

12. Isaev A. S., Bartalev S. A., Lupyan E. A., Lukina N. V. [Satellite remote sensing is a unique tool for monitoring of Russian forests]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk.* 2014, Vol. 84, No. 12, P. 1073 (In Russ.).

13. Do-Hyung Kim, Joseph O. Sexton, Praveen Noojipady, Chengquan Huang, AnupamAnand, Saurabh Channan, Min Feng, John R. Townshend Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000. *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, P. 178–193.

14. Dejvis Sh. M., Landgrebe D. A., Filips T. L. *Distantsionnoe zondirovanie: kolichestvenny podkhod* [Remote sensing: the quantitative approach]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 415 p.

15. Kronberg P. *Distantsionnoe izuchenie Zemli.* [Remote study of the Earth]. Moscow, Mir Pabl., 1988, 350 c.

16. White J. D., Ryan K. C., Key C. C., Running S. W. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 1996, No. 6, P. 125–136.

17. Yoram Kaufman, Chris Justice. Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS (Version 2.2), 1998.

18. Volokitina A. V., Sofronov M. A. [Classification of plant combustible materials] *Lesovedenie*. 1996, No. 3, P. 38–44.

19. Kurbatsky N. P. *Pozhary taygi, zakonomernosti ikh vozniknoveniya i razvitiya: Avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk.* [Fires of taiga, the regularities of their origin and development. Abstr. Dr. agr. sci. diss]. Krasnoyarsk, 1964, 54 p.

© Антамошкина О. А., Корец М. А. 2015

УДК 004.5

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 819–827

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АНСАМБЛЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ С ОТБОРОМ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ

И. А. Иванов*, Е. А. Сопов, И. А. Панфилов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: ilyaiv92@gmail.com

Снижение размерности признакового пространства и настройка алгоритмов обучения для решения практических задач являются важными проблемами машинного обучения. Предложен подход, основанный на многокритериальной оптимизации, для отбора информативных признаков и настройки параметров алгоритмов обучения. Эффективность предлагаемого многокритериального подхода сравнивается с однокритериальным подходом. В качестве тестовой практической задачи машинного обучения для сравнения двух упомянутых подходов выбрана задача распознавания эмоций по аудиовизуальной информации. В качестве базового алгоритма обучения выбрана нейронная сеть, параметры которой настраиваются автоматически с помощью генетического алгоритма. В результате применения многокритериального подхода к настройке параметров нейросети пользователь получает множество нейросетей с парето-оптимальными значениями параметров. Для того чтобы получить единственное выходное значение, полученные парето-оптимальные нейросети объединяются в коллектив. В работе протестировано несколько способов слияния выходов алгоритмов коллектива, таких как метод голосования, усреднение апостериорных вероятностей классов и метаклассификация. Согласно полученным результатам, подход к отбору признаков, основанный на многокритериальной оптимизации, обеспечил точность классификации эмоций в среднем на 2,8 % больше, чем однокритериальный подход. Многокритериальный подход на 5,4 % эффективнее, чем использование метода главных компонент, и на 13,9 % эффективнее, чем использование первоначального набора признаков для классификации без проведения предварительного снижения размерности. Многокритериальный подход применительно к оптимизации параметров нейросети обеспечил точность классификации в среднем на 7,1 % больше, чем однокритериальный подход. Полученные результаты доказывают, что многокритериальный подход, предложенный в данной статье, более эффективен при решении задачи распознавания эмоций, чем однокритериальный подход и стандартные методы отбора признаков и настройки параметров нейросетей.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, распознавание эмоций, слияние данных, слияние моделей, человеко-машинное взаимодействие, нейронная сеть.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 819–827

MULTI-OBJECTIVE APPROACH FOR DESIGNING ENSEMBLE OF NEURAL NETWORK CLASSIFIERS WITH FEATURE SELECTION FOR EMOTION RECOGNITION PROBLEM

I. A. Ivanov*, E. A. Sopov, I. A. Panfilov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: ilyaiv92@gmail.com

Reducing the dimensionality of datasets and configuring learning algorithms for solving particular practical tasks are the main problems in machine learning. In this work we propose the multi-objective optimization approach to feature selection and base learners hyper-parameter optimization. The effectiveness of the proposed multi-objective approach is compared to the single-objective approach. We chose emotion recognition problem by audio-visual data as a benchmark for comparing the two mentioned approaches. Also we chose neural network as a base learning algorithm for testing the proposed approach to parameter optimization. As a result of multi-objective optimization applied to parameter configuration we get the Pareto set of neural networks with optimal parameter values. In order to get the single output, the Pareto optimal neural networks were combined into an ensemble. We tried several ensemble model fusion techniques including voting, average class probabilities and meta-classification. According to the results, multi-

objective optimization approach to feature selection provided an average 2.8 % better emotion classification rate on the given datasets than single-objective approach. Multi-objective approach is 5.4 % more effective compared to principal components analysis, and 13.9 % more effective compared to not using any dimensionality reduction at all. Multi-objective approach applied to neural networks parameter optimization provided on average 7.1 % higher classification rate than single-objective approach. The results suggest that the multi-objective optimization approach proposed in this article is more effective at solving considered emotion recognition problem.

Keywords: multi-objective optimization, emotion recognition, data fusion, model fusion, human-machine interaction (HMI), neural network.

Введение. На сегодняшний день такие области, как машинное обучение и обнаружение знаний в данных, составляют важнейшую часть разработки интеллектуальных систем. Выбор нужного алгоритма машинного обучения для конкретной задачи важен для построения эффективных моделей. Другой ключевой момент – это настройка параметров выбранного алгоритма для достижения наибольшей эффективности.

Существует много способов настройки параметров алгоритма обучения. Самым простым является ручная настройка, но она эффективна только при небольшом числе параметров и когда имеется достаточная информация о влиянии параметров алгоритма на эффективность решения задачи. Для большинства алгоритмов данные условия не выполняются, поэтому ручная настройка становится непригодной и целесообразнее использовать другие методы.

Традиционные методы оптимизации параметров алгоритмов – поиск по сетке, байесовская оптимизация, случайный поиск и градиентная оптимизация. Также используются более сложные алгоритмы оптимизации для выбора оптимального набора значений параметров алгоритма.

В данной работе предложен метод многокритериальной оптимизации параметров алгоритма обучения. Используются многокритериальные генетические алгоритмы для оптимизации параметров нейронной сети. Предложенный многокритериальный метод сравнивается с классическим однокритериальным методом оптимизации параметров на тестовой задаче распознавания эмоций человека по аудио- и видеозаписи.

В однокритериальной постановке параметры нейронной сети, такие как число нейронов и число итераций обучения сети, были использованы в качестве входных переменных задачи, а точность классификации эмоций соответствующей нейронной сетью – в качестве максимизируемого критерия. Результат оптимизации – нейронная сеть с оптимальными значениями параметров. В многокритериальной постановке был добавлен второй (минимизируемый) критерий – число нейронов сети. Результат оптимизации – множество нейронных сетей с парето-оптимальными настройками. Мы объединили данные нейросети в коллектив, чтобы получить единственный, обобщенный выход системы классификации. Было опробовано несколько методов слияния классификаторов коллектива: метод голосования, усреднение апостериорных вероятностей классов, метаклассификация методом опорных векторов.

Другой ключевой аспект при решении задач машинного обучения связан с отбором информативных признаков и снижением размерности данных. Модели, построенные на данных с меньшим числом признаков, более простые и робастные, а следовательно, обеспечивают лучшие обобщающие свойства и требуют меньших вычислительных затрат. Выделяют 2 способа снижения размерности – трансформация признаков и отбор признаков.

В методах, использующих способ трансформации признаков, как и следует из названия, множество признаков по некоторым правилам отображается в другое, меньшее множество признаков. Самый известный метод этого класса – метод главных компонент (principal components analysis, PCA).

В методах, использующих способ отбора признаков, из начального множества признаков выбирается подмножество наиболее информативных признаков. В методах данного класса зачастую используются однокритериальные оптимизационные процедуры для нахождения оптимального подмножества признаков. В данной работе мы предлагаем использовать методы многокритериальной оптимизации для отбора признаков. К традиционному максимизируемому критерию – точности классификации, мы добавляем второй (минимизируемый) критерий – число выбранных признаков. Добавляя данный критерий, мы усиливаем эффект снижения размерности. На тестовой задаче сравнивается эффективность однокритериального и многокритериального метода к отбору признаков, метода главных компонент, а также случая без снижения размерности.

Задача распознавания эмоций используется в качестве тестовой для сравнения эффективности рассматриваемых методов. Распознавание эмоций – важная часть систем человеко-машинного взаимодействия (ЧМВ). Для построения интеллектуального интерфейса между машиной и пользователем машина должна обладать как можно более полной информацией о пользователе, такой как пол пользователя, его возраст, эмоциональное состояние и др. Сегодня существует множество работ различных исследователей в области создания диалоговых систем, важнейшей частью которых является сбор информации о пользователе.

Распознавание человеческих эмоций – наиболее сложная часть глобальной задачи построения эффективной диалоговой системы. Сложности возникают вследствие того, что человеческие эмоции зачастую внешне слабо выражены и быстро меняются. Тем не менее, в данной работе мы делаем попытку построить систему, распознающую эмоции человека по голосу и видеозаписи лица.

Обзор значимых публикаций. Метод, описанный в данной статье, основан на использовании процедуры многокритериальной оптимизации. Ниже мы приведем обзор наиболее значимых современных эволюционных методов многокритериальной оптимизации.

Алгоритм многокритериальной оптимизации Strength Pareto Evolutionary algorithm (SPEA) был предложен Цицлером и Тилем [1]. В нем напрямую используется идея доминирования по Парето для ведения поиска в направлении фронта Парето. Разнообразие популяции решений поддерживается благодаря встроенной процедуре кластеризации. Non-dominated Sorting Genetic algorithm (NSGA) – еще один известный алгоритм многокритериальной оптимизации, разработанный Дебом и др. [2]. Идея алгоритма заключается в недоминируемой сортировке решений популяции. Пусть имеется некоторая популяция решений. Сначала находят среди них недоминируемые, присваивают им ранг 1 и исключают из популяции. Затем среди оставшихся решений также ищут недоминируемые, присваивают им ранг 2, исключают из популяции. Данная процедура продолжается до тех пор, пока каждому решению популяции не будет присвоен ранг. После недоминируемой сортировки выполняются стандартные генетические операторы – селекция (вероятность выбора решений с меньшим рангом больше), скрещивание, мутация, элитизм. Vector Evaluated Genetic algorithm (VEGA), предложенный Шафером [3], является классическим алгоритмом многокритериальной оптимизации, относящимся к классу эволюционных алгоритмов. В нем используется идея селекции по каждому критерию в отдельности, в следующее поколение переходит часть решений, оптимальных по первому критерию, часть – по второму и т. д.

Идея использования алгоритмов оптимизации для настройки алгоритмов машинного обучения не нова. Классические методы используют градиентные алгоритмы оптимизации. Но в случае, когда не имеется явно заданной функциональной зависимости между параметрами алгоритма и его эффективностью, вычисление градиента невозможно, следовательно, надо использовать поисковые алгоритмы нулевого порядка, в которых требуется только вычисление оптимизируемой функции, без вычисления ее производных.

Наибольшее число исследований в области оптимизации параметров алгоритмов машинного обучения было проведено применительно к нейросетям. Бергстра и Бенджио в своей работе [4] показали, что случайный поиск статистически более эффективен для настройки нейронных сетей и сетей глубокого обучения, чем поиск по сетке и поиск вручную. Они заявили, что в проведенных экспериментах при использовании разных выборок данных на эффективность работы нейросети оказывали влияние разные параметры, причем число параметров, влияющих на эффективность, невелико. Данное наблюдение делает поиск по сетке непригодным для настройки нейросетей на новых данных.

Ларошель и др. [5] использовали жадную послойную процедуру для обучения многослойной сети глубокого обучения. Они разделили процесс настройки параметров сети на два этапа. На первом этапе настраиваются параметры сети, соответствующие отдельным слоям. На втором этапе все параметры сети настраиваются, используя алгоритм обратного распространения ошибки и градиентный спуск по глобальной функции издержек. Параметры сети, найденные на первом этапе, используются в качестве начального приближения на втором этапе.

В работе Opitz, Shavlik [6] авторы использовали генетический алгоритм для поиска популяции эффективных нейросетей, которые при этом были несходны друг с другом. Несхожесть определяется как дисперсия между выходом, производимым сетью, и выходом, производимым ансамблем нейросетей популяции. Пригодность каждой сети вычисляется как взвешенная сумма ее точности и несхожести относительно других сетей. Конечная популяция сетей объединяется в ансамбль, из выходов сетей формируется взвешенная сумма, где вес каждой сети пропорционален ее точности.

Смит и Джин в своей работе [7] предложили гибридный многокритериальный эволюционный алгоритм для оптимизации структуры рекуррентных нейросетей, используемых для анализа временных рядов. Они используют несколько методов выбора решений из найденного множества Парето. В первом методе выбираются все решения ниже определенного порогового значения, во втором – по ошибке обучения. Также выбираются решения вблизи точки перегиба фронта Парето и решения, отличающиеся от других решений популяции. Авторы заявляют, что такой гибридный подход к селекции решений превосходит по эффективности отдельно взятые первый и второй метод.

Отбор признаков – это этап предобработки данных в задачах машинного обучения. Отбор признаков наиболее актуален в задачах с большим числом признаков. Данная предобработка данных производится с целью упрощения будущей модели, что приводит к уменьшению вычислительных затрат и к лучшим обобщающим свойствам модели. В сложных задачах машинного обучения число признаков в используемой выборке может быть велико, поэтому исследователи используют алгоритмы глобальной оптимизации для поиска оптимального подмножества признаков. Методы отбора признаков, в которых используются процедуры оптимизации, называются метаэвристическими методами. Данные методы разделяют на три группы по тому, как в них объединяется алгоритм отбора признаков и построение модели: фильтровые методы (filter), оберточные методы (wrapper) и встроенные методы (embedded). Фильтровые методы отбирают признаки отдельно от построения модели. Оберточные методы оценивают подмножества признаков [8]. Это позволяет выявлять взаимное влияние признаков, но увеличивает время вычислений. Во встроенных методах в алгоритм обучения уже встроен алгоритм отбора признаков [9]. Это уменьшает время вычислений, но налагает некоторые ограничения на решаемую задачу: алгоритм обучения должен заранее обладать информацией о том, какой набор признаков является «хорошим выбором» для решаемой задачи.

Задача распознавания эмоций также освещалась в статьях некоторых исследователей. В статье Рашида и др. [10] предлагается объединять аудио- и видеопризнаки при распознавании эмоций. Из аудиопотока он извлекает просодические признаки и мелчастотные кепстральные коэффициенты. Для видео применяются алгоритмы обнаружения лицевых признаков (нос, рот, глаза и т. п.), их координаты образуют видеопризнаки. Для снижения размерности видеопризнаков используется метод PCA. После этого на аудио- и видеовыборках используется мультиклассовый метод опорных векторов и производится слияние выходов построенных классификаторов. Построив классификатор на аудиоданных, автор достиг точности классификации 67,39 %, на видеоданных – 74,15 %. Объединение аудио- и видеоданных увеличило точность до 80,27 %.

Каху и др. в своей работе [11] описали метод, который они с коллегами использовали в 2013 году для участия в соревновании по распознаванию эмоций (Emotion Recognition in the Wild Challenge). Метод объединял несколько сетей глубокого обучения, включая глубокие конволюционные нейронные сети (CNN) для анализа выражения лица по видео, deep belief network (DBN) для анализа аудиоинформации, deep autoencoder для моделирования пространственно-временной информации о человеческих действиях и неглубокие сети (shallow network architecture) для анализа области рта основного субъекта анализируемой сцены. Авторы использовали выборку лиц Торонто (Toronto Face Dataset), содержащую 4178 изображений, вручную помеченных изображенными на них эмоциями, а также выборку изображений, извлеченную из поиска изображений Google (35887 изображений, 7 классов эмоций). Все изображения были уменьшены до размера 48 × 48 и переведены в черно-белый формат. Были опробованы несколько методов интеграции перечисленных выше систем: усреднение предсказанных вероятностей классов, метаклассификация методом опорных векторов (SVM) и многослойным персептроном (MLP). Наилучшая достигнутая ими точность классификации на тестовой выборке конкурса – 41,03 %.

В статье Круза и др. [12] использована идея моделирования изменений признаков. Сначала производится извлечение лица из первоначального изображения и извлекаются гистограммы LocalPhaseQuantization (LPQ) из каждой области *n* >. Гистограммы объединяются и формируют вектор признаков, вычисляется производная признаков. Данные подаются на вход линейного SVM, изменения признаков моделируются скрытыми марковскими моделями. Предложенный метод был протестирован на выборке конкурса Audio/Visual Emotion Challenge 2011 года, которая содержит 63 видео 13 человек, проходящих интервью. Авторы заявляют, что им удалось улучшить точность классификации на исследуемых данных на 13 %.

В статье Soleymani и др. [13] авторы используют энцефалограмму, реакцию зрачков и дальность взгляда для классификации возбужденности субъекта на три класса – спокойный, средневозбужденный, активный, а также настроения субъекта на три класса – плохое, нейтральное, хорошее. Используемые данные включают в себя 20 видео эмоционального содержания, взятых из кинофильмов. Достигнутая точность классификации настроения – 68,5 %, возбужденности – 76,4 %.

Буссо и др. [14] также исследовали идею интеграции акустической информации и выражения лица. Они использовали базу данных видеозаписей актрисы, читающей 258 предложений с выражением эмоций. Были построены классификаторы, использующие только аудиоданные (точность 70,9 %) и только видеоданные (85 %). Авторы опробовали интеграцию аудио- и видеоинформации на уровне данных, т. е. соединив выборки в единую выборку и построив на ее основе классификатор (90 %), и на уровне классификаторов, т. е. построив отдельные классификаторы по аудио- и видеоданным и объединив их выходы (84–89 %).

Методология. В данной работе мы предлагаем применить многокритериальной подход к оптимизации параметров алгоритмов машинного обучения и к отбору признаков.

Предложенный метод отбора признаков, использующий многокритериальную оптимизацию, относится к классу оберточных методов. Мы сравнили его с методом PCA и однокритериальным отбором признаков. Методы отбора признаков, основанные на оптимизации, были спроектированы следующим образом. Входящие переменные представляют собой бинарный вектор длины $\boldsymbol{m}$, где $\boldsymbol{m}$ – это исходное число признаков выборки. Каждый бит такого вектора принимает значение 1 либо 0, где 1 означает, что соответствующий признак выбран для дальнейшего включения в модель, 0 – не выбран. В однокритериальной постановке точность классификации является максимизируемым критерием и задается следующим образом:

$$R = (N_c / N) \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где N_c – число верно классифицированных объектов выборки; N – общее число объектов выборки; R – точность классификации.

В многокритериальной постановке добавляется второй (минимизируемый) критерий – число выбранных признаков. Идея данного критерия в том, что модели, построенные на выборках с меньшим количеством признаков, проще, а следовательно, обладают лучшей обобщающей способностью.

Мы выбрали класс эволюционных алгоритмов оптимизации для решения задачи отбора признаков в вышеприведенной постановке, потому что алгоритмы данного класса позволяют эффективно находить глобальный оптимум и для их использования не требуется информация о поверхности оптимизируемой функции.

В однокритериальной постановке мы использовали коэволюционный генетический алгоритм (ГА). Данный алгоритм объединяет несколько стандартных ГА, у которых различаются значения параметров. Стандартные ГА параллельно работают некоторое

количество итераций, после чего обмениваются индивидами между собой (миграция индивидов) и сохраняют лучшие найденные решения (элитизм). Такой алгоритм освобождает исследователя от настройки параметров стандартного ГА, неправильная настройка которых может зачастую привести к неудовлетворительным результатам оптимизации.

В многокритериальной постановке мы использовали алгоритм SPEA. Значения параметров алгоритмов оптимизации представлены в табл. 1. Вероятность скрещивания и мутации указана как низкая. Количественно данные вероятности вычислялись по следующей формуле:

$$p = \frac{1}{k \times |P|}, \qquad (2)$$

где $k = 3$ в наших экспериментах, но может принимать и другие действительные неотрицательные значения; $|P|$ – размер популяции; p – значение вероятности.

Многокритериальный подход был также применен для оптимизации параметров нейронной сети. Нейронная сеть прямого распространения была выбрана в качестве алгоритма обучения по нескольким причинам. Во-первых, нейронные сети ранее успешно применялись для решения практических задач анализа изображений. Во-вторых, эффективность нейронных сетей в значительной мере зависит от настройки их параметров. Была использована однослойная нейронная сеть с переменным числом нейронов и сигмоидной активационной функцией.

В однокритериальной постановке входящие переменные включают общее число нейронов сети N_n (границы изменения $N_n = \overline{2,50}$) и число итераций обучения сети N_t (границы изменения $N_t = \overline{2,200}$). Оптимизируемый критерий – точность классификации, как и в задаче отбора признаков.

В многокритериальной постановке отличие заключается в том, что добавляется второй (минимизируемый) критерий – число нейронов сети. Данный критерий одновременно является первой входящей переменной.

Таблица 1

Значения параметров генетических алгоритмов

Параметр генетических алгоритмов	Значение
Размер популяции	50
Число итераций	50
Вероятность скрещивания	Низкая
Тип скрещивания	Равномерный
Вероятность мутации	Низкая
Максимальный размер внешнего множества (SPEA)	50
Интервал адаптации	5
Размер штрафа (% от размера популяции)	10
Минимальный гарантированный размер популяции (% от начального размера популяции)	10

Для решения сформулированных задач оптимизации также были использованы эволюционные алгоритмы оптимизации: в однокритериальной постановке – коэволюционный ГА, в многокритериальной постановке – SPEA, NSGA-2, VEGA и SelfCOMOGA [15]. В алгоритме SelfCOMOGA алгоритмы SPEA, NSGA-2 и VEGA работают параллельно и через фиксированное число итераций производят процедуру миграции индивидов и элитизма подобно тому, как это делается в коэволюционном ГА. Для ранжирования индивидов производится их недоминируемая сортировка, которая является обобщением обычной сортировки на случай многих критериев.

В однокритериальной постановке решением задачи является нейронная сеть с найденными оптимальными значениями параметров. В многокритериальной же постановке мы получаем множество Парето оптимальных нейронных сетей. Для того чтобы можно было сравнивать два эти подхода, получаемое парето-оптимальное множество нейросетей объединяется в коллектив. Мы опробовали три метода объединения классификаторов в коллектив:

1. Метод голосования.
2. Усреднение вероятностей классов – получаемые на выходе классификатора вероятности классов усредняются по всем классификаторам коллектива.
3. Метаклассификация – обучающую выборку разделяют на 2 части, первая часть используется для обучения классификаторов коллектива. Получаемые на выходе классификаторов вероятности классов используют в качестве входящих переменных дополнительного метаклассификатора, который обучают на второй части выборки. Метаклассификатор на выходе выдает класс, предсказанный для данного объекта выборки.

Все использованные в нашей работе алгоритмы оптимизации были программно реализованы на языке C#. Также была использована готовая реализация на языке R- алгоритмов нейронная сеть, метод опорных векторов и метод PCA.

В качестве исходных данных использовалась аудиовизуальная база данных эмоций SAVEE [16]. Распределение классов эмоций в базе данных представлено на рис. 1. Для того чтобы можно было строить количественные модели, из «сырых» данных были извлечены количественные аудио- и видеопризнаки. Для извлечения аудиопризнаков мы использовали программу openSMILE – свободно распространяемое ПО для извлечения признаков из аудио и видео (Eyben и др., [17]). Видеопризнаки были извлечены 3 алгоритмами (см. рисунок):

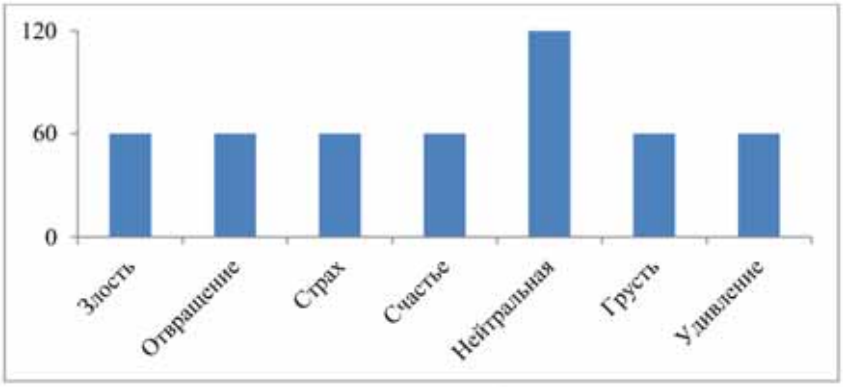
1) Quantized Local Zernike Moments (QLZM) (Sariyanidi и др., [18]);
2) Local Binary Patterns (LBP) (Ojala и др., [19]);
3) Local Binary Patterns on Three Orthogonal Planes (LBP-TOP) (Zhao, Pietikäinen, [20]).

Мы выбрали алгоритмы QLZM и LBP-TOP, потому что они современны и успешно использовались другими исследователями при анализе изображений и видео. Алгоритм LBP выбран, потому что это классический алгоритм для анализа изображений, который может служить как нижняя оценка эффективности построенной системы распознавания, с которой удобно сравнивать другие методы.

Алгоритмы QLZM и LBP извлекают признаки из каждого последовательного кадра видеозаписи, тогда как LBP-TOP учитывает изменение пикселей кадров во времени и извлекает вектор признаков из нескольких последовательно идущих кадров. Векторы признаков, извлеченные алгоритмами QLZM и LBP, усреднялись по всей длине видеозаписи. Мы также объединили извлеченные аудио- и видеопризнаки в единую выборку, чтобы проверить, поможет ли объединение аудио- и видеопризнаков в улучшении эффективности распознавания эмоций. Количество извлеченных аудио- и видеопризнаков представлено в табл. 2. Объединенная выборка аудио- и видеопризнаков обозначена как «аудио + видео». Количество извлеченных признаков велико, поэтому этап предобработки данных с целью отбора информативных признаков имеет смысл.

Результаты экспериментов. Результаты экспериментов по снижению размерности и отбору информативных признаков показаны в табл. 2. Мы провели сравнение трех методов снижения размерности: PCA, отбор признаков методом однокритериальной и многокритериальной оптимизации. По результатам видно, что многокритериальный метод отбора признаков превзошел другие методы по эффективности на выборках QLZM, LBP-TOP, аудио и аудио + видео (4 из 5 рассмотренных выборок), проиграв однокритериальному методу незначительные 0,3 % на выборке LBP.

Эксперименты по оптимизации параметров нейронных сетей проводились для каждой имеющейся выборки данных, различных алгоритмов оптимизации и различных методов объединения коллектива классификаторов. Пример полученного множества парето-оптимальных нейронных сетей с помощью алгоритма многокритериальной оптимизации NSGA-2 представлен в табл. 3.



Распределение классов в базе данных эмоций

Таблица 2

Точность классификации эмоций (%) для различных выборок и подходов к снижению размерности

Выборка			Аудио	QLZM	LBP	LBP-TOP	Аудио + видео
Число признаков			991	656	59	177	1883
Точность классификации после снижения размерности	Все признаки		28,542	10,506	20,486	22,847	19,732
	Метод главных компонент		35,923 / 131	21,458 / 36	23,75 / 4	32,017 / 10	31,718 / 180
	Отбор признаков	Однокритериальная оптимизация	38,095 / 476	20,208 / 301	**25,3972** / 33	40,278 / 77	33,661 / 902
		Многокритериальная оптимизация	**39,702** / 484	**24,911** / 319	25,694 / 31	**45,694** / 90	**35,893** / 885

Таблица 3

Парето-оптимальное множество нейронных сетей, многокритериальная постановка, аудиоданные, алгоритм оптимизации NSGA-2

№	Число нейронов	Число итераций обучения	Точность классификации
1	10	119	10,88
2	12	20	29,49
3	13	113	30,34
4	24	150	33,38
5	14	73	33,69
6	11	119	15,88
7	29	100	35,38
8	39	144	32,02
9	15	51	15,44
10	23	74	27,89

В табл. 4 представлены обобщенные результаты экспериментов по оптимизации параметров нейросетей. Заметим, что объединение парето-оптимальных нейронных сетей, представленных в табл. 3, в коллектив увеличило точность классификации эмоций до 39,76 %. Согласно полученным результатам, многокритериальный метод оптимизации параметров нейронных сетей применительно к задаче распознавания эмоций превосходит однокритериальный метод на всех 5 рассмотренных выборках данных.

Мы не можем дать определенных рекомендаций по поводу того, какой многокритериальный алгоритм оптимизации лучше использовать, так как каждый из них обеспечил наилучшую точность на разных выборках данных. Метаклассификация по результатам экспериментов оказалась наиболее эффективным методом объединения коллектива классификаторов, обеспечив лучшую точность классификации на 4 из 5 выборках. Тот факт, что на разных выборках лучшие результаты были получены разными алгоритмами многокритериальной оптимизации, но одинаковым методом объединения парето-оптимальных классификаторов в коллектив, означает, что метод метаклассификации инвариантен к выбору алгоритма оптимизации.

Мы объединили все полученные нами результаты по решению задачи распознавания эмоций в табл. 5, выделив наиболее эффективные использованные методы. Самый эффективный из опробованных нами методов – использование многокритериального подхода к оптимизации параметров нейросетей на выборке данных LBP-TOP, полученная точность классификации эмоций – 45,7 %. Базовая модель, которая для всех объектов тестовой выборки предсказывает класс, наиболее часто встречающийся в обучающей выборке, для данной задачи обеспечивает точность 25 %. Учитывая сложность решаемой задачи распознавания эмоций, полученное улучшение точности распознавания является значительным.

Заключение. В данной работе использован метод многокритериальной оптимизации для отбора признаков и оптимизации параметров нейронных сетей, предложенный метод апробирован на задаче распознавания эмоций.

Согласно полученным результатам, многокритериальный метод отбора признаков обеспечил в среднем по выборкам на 2,8 % лучшую точность классификации, чем однокритериальный метод. Также мы установили, что многокритериальный метод отбора признаков на 5,4 % эффективнее, чем алгоритм PCA, и на 13,9 % эффективнее, чем использование исходного набора признаков для построения системы классификации. Таким образом, предложенный многокритериальный метод отбора признаков оказался самым эффективным из рассмотренных для решения задачи распознавания эмоций. Мы рекомендуем использовать его в дальнейших работах по распознаванию эмоций, а также в смежных задачах машинного обучения.

Также в работе применен многокритериальный метод для оптимизации параметров нейросетей. Полученные результаты доказывают, что объединение нейросетей с парето-оптимальными настройками в коллектив позволяет получить лучшую точность классификации эмоций, чем использование одной нейросети с оптимальными настройками, найденными с помощью однокритериальной оптимизации. Разница в эффективности составляет 7,1 %. Мы советуем использовать метаклассификацию в качестве метода объединения парето-оптимальных классификаторов в коллектив, так как данный метод в ходе проведения экспериментов обеспечил лучшую точность классификации эмоций на 4 из 5 выборок. Однако необходимо провести дальнейшее исследование на других задачах машинного обучения, чтобы доказать справедливость полученных в данной работе результатов.

Благодарности. Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (МК-3285.2015.9).

Acknowledgments. The research was supported by President of the Russian Federation grant (MK-3285.2015.9).

Таблица 4

Точность классификации (%) для задачи распознавания эмоций в различных постановках

Алгоритм оптимизации (число критериев)	Схема слияния выходов ансамбля	Данные				
		Аудио	QLZM	LBP	LBP-TOP	Аудио + видео
Коэволюционный ГА (1)	–	35,923	21,458	23,75	32,917	31,718
SPEA (2)	Голосование	31,012	16,319	16,667	34,167	27,292
	Усреднение вероятностей классов	16,994	10,903	16,458	39,583	14,256
	Метаклассификация	28,631	16,042	18,264	34,583	25,06
NSGA-2 (2)	Голосование	29,226	21,181	19,236	33,403	24,554
	Усреднение вероятностей классов	29,435	14,722	16,667	17,639	23,571
	Метаклассификация	39,762	11,528	17,5	38,125	34,94
VEGA (2)	Голосование	33,839	17,5	24,514	32,639	22,5
	Усреднение вероятностей классов	27,262	24,306	20,069	21,042	15,119
	Метаклассификация	38,899	13,958	29,167	36,736	37,292

Окончание табл. 4

Алгоритм оптимизации (число критериев)	Схема слияния выходов ансамбля	Данные				
		Аудио	QLZM	LBP	LBP-TOP	Аудио + видео
SelfCOMOGA (2)	Голосование	26,577	20,347	33,125	36,25	19,94
	Усреднение вероятностей классов	23,244	15,935	25,417	22,708	17,768
	Метаклассификация	36,518	26,756	38,333	36,319	29,405

Таблица 5

Обобщенное ранжирование методологий и данных, с помощью которых была получена наибольшая точность распознавания эмоций

Ранг	Методология	Данные	Точность классификации, %
1	Отбор признаков, многокритериальная оптимизация	LBP-TOP	45,694
2	Оптимизация нейросети, NSGA-2, схема слияния выходов: метаклассификация методом опорных векторов	Аудио	39,762
3	Отбор признаков, многокритериальная оптимизация	Аудио	39,702
4	Оптимизация нейросети, SPEA, схема слияния выходов: усреднение вероятностей классов	LBP-TOP	39,583
5	Оптимизация нейросети, SelfCOMOGA, схема слияния выходов: метаклассификация методом опорных векторов	LBP	38,333
6	Оптимизация нейросети, VEGA, схема слияния выходов: метаклассификация методом опорных векторов	Аудио + видео	37,292
7	Отбор признаков, многокритериальная оптимизация	Аудио + видео	35,893

Библиографические ссылки

1. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach // IEEE transactions on evolutionary computation. 1999. P. 257–271.

2. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II / K. Deb [et al.] // IEEE Trans. on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6, No. 2. P. 182–197.

3. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Genetic Algorithms. 1985. P. 93–100.

4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization // Journal of Machine Learning Research. 2012. 13. P. 281–305.

5. Exploring strategies for training deep neural networks / H. Larochelle [et al.] // Journal of Machine Learning Research. 2009. 1. P. 1–40.

6. Opitz D. W., Shavlik J. W. Generating accurate and diverse members of a neural-network ensemble // *Advances in neural information processing systems*. 1996. P. 535–541.

7. Smith C., Jin Y. Evolutionary multi-objective generation of recurrent neural network ensembles for time series prediction // Neurocomputing. 2014. Vol. 143. P. 302–311.

8. Phuong T. M., Lin Z., Altman R. B. Choosing SNPs using feature selection // Proceedings IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference. 2005. P. 301–309.

9. Duval B., Hao J.-K., Hernandez Hernandez J. C. A memetic algorithm for gene selection and molecular classification of an cancer // In Proceedings of the 11th Annual conf. on Genetic and evolutionary computation, GECCO ’09. New York, 2009. P. 201–208.

10. Rashid M., Abu-Bakar S. A. R., Mokji M. Human emotion recognition from videos using spatio-temporal and audio features // Vis Comput. 2013. 29. P. 1269–1275.

11. Combining modality specific deep neural networks for emotion recognition in video / S. E. Kahou [et al.] // Proceedings of the 15th ACM on Intern. Conf. on Multimodal Interaction. Sydney, 2013. P. 543–550.

12. Cruz A., Bhanu B., Thakoor N. Facial emotion recognition in continuous video // Proceedings of the 21st Intern. Conf. on Pattern Recognition (ICPR 2012) (November 11–15, 2012, Tsukuba, Japan). P. 1880–1883.

13. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos // IEEE Trans-

actions on affective computing. 2012. Vol. 3, no. 2. P. 211–223.

14. Analysis of emotion recognition using facial expressions / C. Busso [et al.] // Proceedings of the 6th Intern. Conf. on Multimodal interfaces. 2004. P. 205–211.

15. Иванов И. А., Сопов Е. А. Самоконфигурируемый генетический алгоритм решения задач поддержки многокритериального выбора // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 30–35.

16. Haq S., Jackson P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition // Proc. Int. Conf. on Auditory-Visual Speech Processing (AVSP'09), Norwich, UK, 2009, p.53-58.

17. Eyben F., Wullmer M., Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor // In Proceedings ACM Multimedia (MM), ACM. Florence, 2010. P. 1459–1462.

18. Local Zernike moment representation for facial affect recognition / E. Sariyanidi [et al.] // Proc. of British Machine Vision Conference. 2013. P. 1–13.

19. Ojala T., Pietikäinen M., Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions // Pattern Recognition. 1996. 29. P. 51–59.

20. Zhao G., Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using local binary patterns with an application to facial expressions // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2007. 29(6). P. 915–928.

References

1. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1999, P. 257–271.

2. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, April 2002, P. 182–197.

3. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proc. of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, 1985, P. 93–100.

4. Bergstra J., Bengio Y. Random search for hyper-parameter optimization. *Journal of Machine Learning Research 13*, 2012, P. 281–305.

5. Larochelle H., Bengio Y., Louradour J, Lamblin P. Exploring strategies for training deep neural networks. *Journal of Machine Learning Research 1*, 2009, P. 1–40.

6. Opitz D. W., Shavlik J. W. Generating accurate and diverse members of a neural-network ensemble. *Advances in neural information processing systems,* 1996, P. 535–541.

7. Smith C., Jin Y. Evolutionary multi-objective generation of recurrent neural network ensembles for time series prediction. *Neurocomputing*, 2014, Vol. 143, P. 302–311.

8. Phuong T. M., Lin Z., Altman R. B. Choosing SNPs using feature selection. *Proceedings IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference*, 2005, P. 301–309.

9. Duval B., Hao J.-K., Hernandez Hernandez J. C. A memetic algorithm for gene selection and molecular classification of an cancer. *In Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation, GECCO '09*, New York, NY, USA, 2009, P. 201–208.

10. Rashid M., Abu-Bakar S. A. R., Mokji M. Human emotion recognition from videos using spatio-temporal and audio features. *Vis Comput,* 2013, Vol. 29, P. 1269–1275.

11. Kahou S. E., Pal C., Bouthillier X., Froumenty P., Gulcehre C., Memisevic R., Vincent P., Courville A., Bengio Y. Combining modality specific deep neural networks for emotion recognition in video. *Proceedings of the 15th ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, 2013, Sydney, Australia, P. 543–550.

12. Cruz A., Bhanu B., Thakoor N. Facial emotion recognition in continuous video. *In Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, November 11–15, 2012, Tsukuba, Japan, P. 1880–1883.

13. Soleymani M., Pantic M., Pun T. Multimodal emotion recognition in response to videos. *IEEE Transactions on affective computing*, Vol. 3, No. 2, April-June, 2012, P. 211–223.

14. Busso C., Deng Z., Yildirim S., Bulut M., Lee C. M., Kazemzadeh A., Lee S., Neumann U., Narayanan S. Analysis of emotion recognition using facial expressions. *Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces*, 2004, P. 205–211.

15. Ivanov I. A., Sopov E. A. [Self-configuring genetic algorithm for solving multi-objective choice support problems]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 1 (47), P. 30–35 (In Russ.).

16. Haq, S., Jackson, P. J. B. Speaker-dependent audio-visual emotion recognition. *Proc. Int. Conf. on Auditory-Visual Speech Processing (AVSP'09)*, Norwich, UK, 2009, P.53-58.

17. Eyben F., Wullmer M, Schuller B. OpenSMILE – the Munich versatile and fast open-source audio feature extractor. *In Proceedings ACM Multimedia (MM)*, ACM, Florence, Italy, ISBN 978-1-60558-933-6, 25.-29.10. 2010, P. 1459–1462.

18. Sariyanidi E., Gunes H., Gokmen M., Cavallaro A. Local Zernike moment representation for facial affect recognition. *Proc. of British Machine Vision Conference*, 2013, P. 1–13.

19. Ojala T., Pietikäinen M., Harwood D. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions. *Pattern Recognition 29*, 1996, P. 51–59.

20. Zhao G., Pietikäinen M. Dynamic texture recognition using local binary patterns with an application to facial expressions. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 29(6)*, 2007, P. 915–928.

© Иванов И. А., Сопов Е. А., Панфилов И. А., 2015

УДК 621.791.722

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 828–832

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ПРОДОЛЬНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИЕЙ ЛУЧА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННОЙ ФОРМЫ КАНАЛА ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Г. Л. Пермяков*, Д. Н. Трушников, В. Я. Беленький, Т. В. Ольшанская

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29
*E-mail: gleb.permyakov@yandex.ru

Исследование посвящено изучению процесса электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением с применением осцилляции пучка при различной фокусировке на примере стали 15Х5М. Рассматривается влияние продольной осцилляции пучка и её параметров на форму канала проплавления, характер протекания процессов тепломассопереноса и параметры сварных швов для разработки методических рекомендаций по электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка.

Представлена численная трёхмерная математическая модель электронно-лучевой сварки, основанная на совместном решении уравнений теплопроводности и Навье–Стокса в подвижной системе координат, с учётом фазовых переходов на границе раздела твёрдой и жидкой фазы. Граничные условия на свободной поверхности сварочной ванны и стенках канала представлены термокапиллярной конвекцией (эффект Марангони). В качестве входных параметров использовалась форма канала проплавления и распределение энергии пучка по стенкам канала, определённые на основе экспериментальных данных по параметрам вторичного сигнала в плазме над зоной сварки с помощью метода синхронного накопления. Форма канала аппроксимирована усечённым конусом со сферической вершиной. Такой подход избавляет от необходимости учета всех сложных факторов, оказывающих воздействие на формирование канала проплавления. Расчёты тепловых и гидродинамических процессов производились на кластере с использованием пакета моделирования COMSOL Multiphysics. Сравнение расчётных и экспериментальных поперечных сечений сварных швов показали хорошее соответствие. С помощью предложенной методики в ходе исследований были выявлены характерные особенности распределения мощности пучка при различных режимах фокусировки. Проведен анализ значимости различных факторов на формирование геометрии проплавления.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, осцилляция пучка, математическая модель, метод синхронного накопления.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 828–832

NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRON-BEAM WELDING WITH A LONGITUDINAL OSCILLATION OF THE BEAM BASED ON THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE KEYHOLE FORM

G. L. Permyakov, D. N. Trushnikov, V. Ya. Belenkiy, T. V. Olshanskaya

Perm National Research Polytechnic University
29, Komsomolskiy Av., Perm, 614990, Russian Federation

The research examines the process of electron-beam welding in the keyhole mode with the use of beam oscillations with different focusing regimes on the example of stainless steel – grade 502. We study the impact of longitudinal beam oscillation and their parameters on the shape of the keyhole, the character of the processes of heat and mass transfer and weld's parameters, to develop methodological recommendations for electron-beam welding with oscillation.

A numerical three-dimensional mathematical model of electron beam welding is presented. The model was developed on the basis of the combined solution of heat conduction equation and Navier–Stokes equation in the moving coordinate system with taking into account phase transitions at the interface of solid and liquid phase. The boundary conditions at the free surface of the weld pool and on the keyhole walls are presented by thermocapillary convection (Marangoni effect). As input parameters the form of keyhole and distribution of the beam energy on the keyhole walls based on experimental data on the parameters of the secondary signal in the plasma over the welding zone by using the method of a synchronous accumulation are used. The keyhole was approximated by an oblique elliptical cone with a spherical apex. Such an approach eliminates the need to take into account all the complex factors that affect the formation of the keyhole. Calculations of thermal and hydrodynamic processes have been carried on a cluster using a

simulation package COMSOL Multiphysics. Comparison of the calculated and experimental cross sections of the welds showed good agreement. With the help of the proposed method during the research characteristic features of the beam power distribution for different focus modes were identified. The analysis of the significance of various factors on the formation of the keyhole geometry has been conducted.

Keywords: electron-beam welding, beam oscillation, the mathematical model, the method of a synchronous accumulation.

Введение. В настоящее время широко известны успехи, достигнутые в области численного моделирования электронно-лучевой и лазерной сварки [1–3]. Однако все результаты связаны с моделированием сварки статическим пучком. Законченные динамические модели сварки с осцилляциями пучка отсутствуют до сих пор. Комплексный характер, высокая скорость протекания процессов, высокие значения градиентов температур и многофакторность процессов делают непосредственное численное моделирование в условии периодических воздействий крайне затруднительным даже с использованием современных вычислительных ресурсов [1]. Основная трудность при моделировании – определение формы канала проплавления.

Для решения этой проблемы ранее была предложена методика экспериментального определения формы канала проплавления при электронно-лучевой сварке с осцилляцией пучка по параметрам вторичного сигнала [4]. Кроме формы канала проплавления указанная методика дает дополнительную информацию о процессах в канале проплавления. В частности, данная методика позволяет определить распределение энергии пучка по стенкам канала проплавления [5]. Такой подход избавляет от необходимости учета всех сложных факторов, оказывающих воздействие на формирование канала проплавления.

Целью данного исследования является использование данных параметров в качестве входных для проведения математических расчётов, определение влияния различных осцилляций пучка и их параметров на форму канала проплавления, протекание процессов тепломассопереноса и параметры швов для разработки методических рекомендаций.

Расчёты тепловых и гидродинамических процессов производились на кластере с использованием пакета моделирования COMSOL Multiphysics. В результате расчётов была получена геометрия сварного шва, поля температур и скоростей течения расплава.

Математическая модель. На рис. 1 показана схема модели. Параметры процесса и физические параметры стали 15Х5М представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Следующие упрощения были сделаны при моделировании процесса сварки:

– ламинарное течение расплава;
– нормальное распределение энергии в пучке;
– линейный, вдоль оси *X*, источник тепла;
– моделирование фазового перехода с помощью скачка вязкости и введения скрытой теплоты фазового перехода;
– форма и размер канала проплавления были определены из экспериментальных данных; канал аппроксимировали усечённым конусом со сферической вершиной.

Реконструкция формы канала. Реконструкция формы канала проплавления и получение данных о распределении энергии в нем осуществлялись посредством регистрации вторичных излучений из зоны сварки методом синхронного накопления [6; 7]. На рис. 2 представлены результаты реконструкции формы канала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией вдоль стыка на трех режимах фокусировки [3; 4]. Для наглядности масштаб вдоль вертикальной и горизонтальной осей выбран неодинаковым. Видно, что при изменении режима фокусировки изменяется характер взаимодействия пучка со стенками канала проплавления. При сварке на недофокусированном режиме электронный пучок взаимодействует в основном с передней стенкой канала проплавления, на перефокусированном – с передней и задней стенками практически одинаково. Полученная форма канала проплавления и распределение энергии пучка в нем использовались при моделировании в качестве входных параметров.

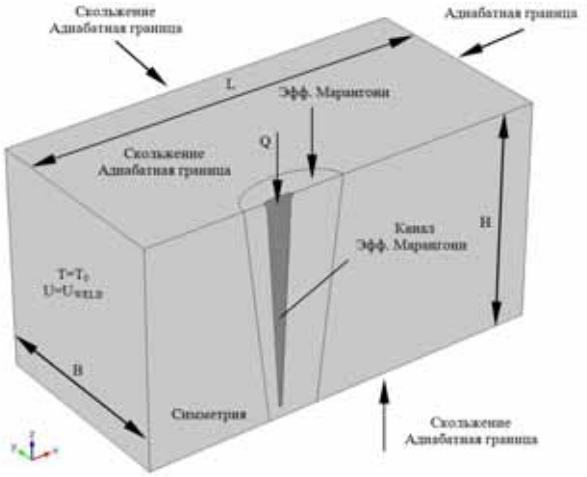


Рис. 1. Геометрия модели, начальные и граничные условия

Таблица 1

Параметры процесса

Тип осцилляции	Параметры пучка		Параметры осцилляции		Скорость сварки $V_{св}$, мм/с
	Мощность Q, кВт	Min радиус, мм	Амплитуда, мм	Частота, Гц	
Продольная	3	0,25	0,75	645	5

Таблица 2

Физические характеристики стали 15Х5М

Характеристика	Обозначение	Величина
Начальная температура	T_0 [K]	293,15
Ликвидус	T_L [K]	1730
Солидус	T_S [K]	1700
Скрытая теплота плавления	L_f [Дж·кг$^{-1}$]	700
Динамическая вязкость	μ [Па·с]	0,007
Плотность	ρ [кг·м$^{-3}$]	7750
Удельная теплоёмкость	c [Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$]	483
Теплопроводность	λ [Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$]	37

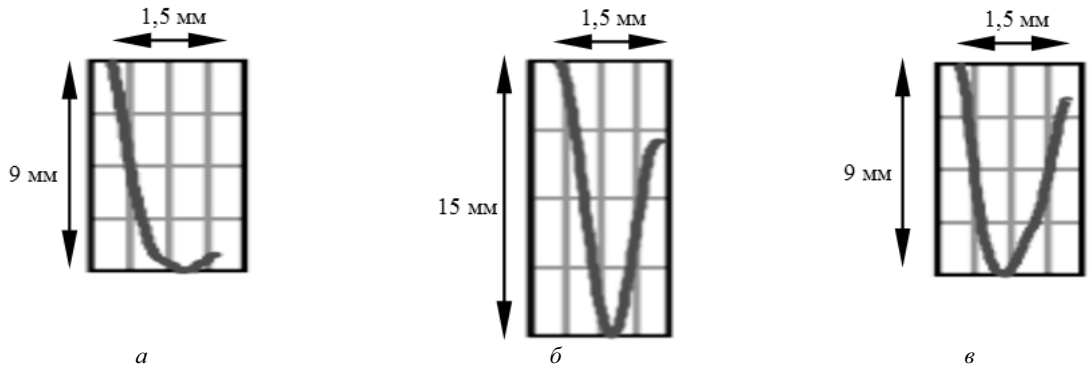


Рис. 2. Результаты реконструкции канала проплавления (продольная проекция) по параметрам вторичного сигнала при электронно-лучевой сварке с осцилляцией вдоль стыка для различных режимов фокусировки: *а* – перефокусированный; *б* – острый фокус; *в* – недофокусированный

Основные уравнения. Модель основана на совместном решении тепловой и гидродинамической задачи обтекания жидким металлом канала проплавления в трехмерной постановке. Рассмотрим основные уравнения для расчетов [1; 8].

Течение жидкого металла описывается уравнениями непрерывности и движения для несжимаемой жидкости в подвижной системе координат:

$$\nabla \vec{u} = 0, \qquad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho\left(\vec{u}\cdot\nabla\right)\vec{u} = \mu\cdot\nabla^2\vec{u} - \nabla P + F, \qquad (2)$$

где ρ – плотность; $\vec{u}$ – вектор скорости течения расплава; μ – динамическая вязкость; P – давление; F – слагаемое, представленное в виде

$$F = \rho g \alpha\left(T - T_{ref}\right) - C\left(\frac{1-f_L}{f_L^3 + B}\right)\vec{u} + \rho V_{\text{ñâ}}\frac{\partial \vec{u}}{\partial x}, \qquad (3)$$

где g – ускорение свободного падения; α – коэффициент термического расширения; T – абсолютная температура; T_{ref} – исходная температура, принятая как температура солидуса (T_S); $V_{св}$ – скорость сварки.

Первый член уравнения представляет термогравитационную конвекцию, второй член уравнения представляет диссипацию энергии в двухфазной зоне в соответствии с уравнением Кармана–Козени [9; 10], где B – небольшая вычислительная постоянная – введена для избегания деления на ноль; C – константа учёта морфологии двухфазной зоны (в данных исследованиях использовалась величина, равная $1{,}6\cdot10^4$ [10]); f_L – жидкая составляющая [11]:

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_L, \\ \left(T - T_S\right)/\left(T_L - T_S\right) & T_S \le T \le T_L, \\ 0 & T < T_S, \end{cases} \qquad (4)$$

где T_L и T_S – температура ликвидуса и солидуса соответственно.

Последний член уравнения (3) описывает движение заготовки относительно электронного пучка.

Распределение тепловой энергии источника в заготовке может быть описано с помощью дифференциального уравнения переноса энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + u \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q}{c\rho}, \qquad (5)$$

где T – абсолютная температура; $a = \lambda / C_{eff} \cdot \rho$ – коэффициент температуропроводности; u – скорость течения расплава; c – теплоёмкость; ρ – плотность; Q – подводимая тепловая мощность.

Скрытая теплота плавления и кристаллизации учитывалась введением эффективной теплоемкости

$$\acute{N}_{eff} = \acute{N}_0 + \frac{\exp[-((T - T_{melt}) / (T_L - T_S))^2]}{\sqrt{\pi}(T_L - T_S)} H_f, \qquad (6)$$

где C_0 – теплоемкость в зависимости от температуры; H_f – скрытая теплота плавления; T_{melt} – температура плавления, которая принята средней в интервале от температуры солидуса до ликвидуса.

На верхней поверхности сварочной ванны и на стенках канала проплавления действует эффект Марангони. Для этих поверхностей в проекциях на оси X, Y и Z можно записать [12–15]:

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \mu \frac{\partial v}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \mu \frac{\partial w}{\partial z} = f_L \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial z}, \qquad (7)$$

где u, v, w – компоненты скорости вдоль осей X, Y и Z соответственно; μ – динамическая вязкость; f_L – жидкая составляющая; $d\gamma / dT$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения; T – абсолютная температура.

Результаты. На рис. 3 представлены экспериментальные и расчётные сечения сварных швов при сварке с продольной осцилляцией для различных режимов фокусировки.

Экспериментальные и расчётные данные для острого фокуса и перефокусированного режима хорошо согласуются. Различия между расчётами и экспериментом для перефокусированного режима вызваны ошибками при определении глубины канала проплавления.

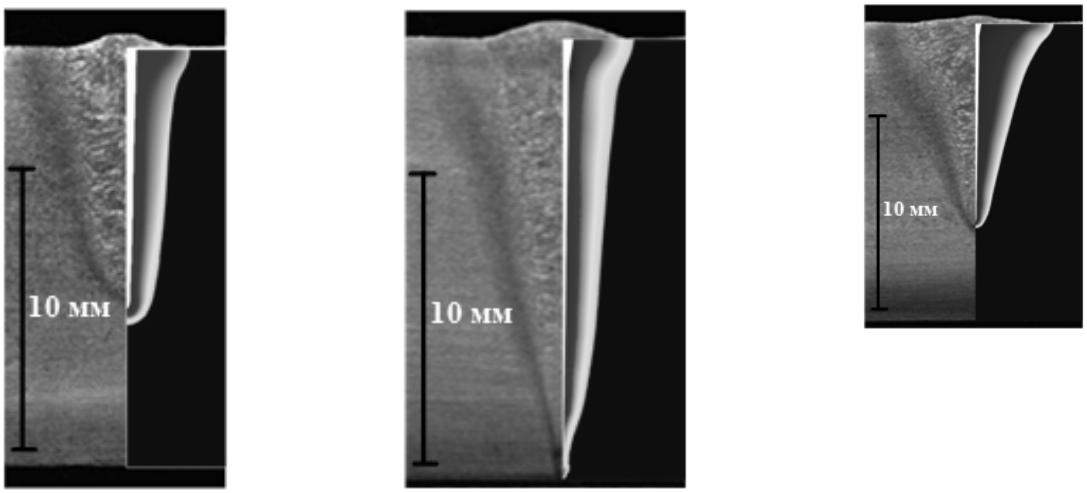
Проведен анализ значимости влияния различных факторов на формирование геометрии проплавления и на вероятность формирования дефектов при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного пучка. Одной из причин специфической формы проплавления с уширением в верхней части являются конвективные явления в жидкой фазе (характерные значения чисел Марангони и Рэлея составили $5 \cdot 10^3$ и $2 \cdot 10^3$). Интенсивность этих явлений зависит от распределения вводимой энергии в канале проплавления и, как следствие, от режима фокусировки. Установлено, что интенсивность конвективных течений, обусловленных эффектом Марангони, повышается при переходе от недофокусированного режима к перефокусированному. Интенсивность термогравитационной конвекции при этом несколько снижается.

Выводы. Математическая модель позволяет проанализировать влияние параметров осцилляций на геометрию швов через изучение влияния геометрии канала на тепломассоперенос в жидкой ванне.

Методика, описанная в статьях [4; 5], может быть использована для определения геометрии канала проплавления.

Благодарности. Работа выполнялась при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 13-08-00397, 14-08-96008 и при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания (проект № 01201460538).

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research RFBR 13-08-00397, 14-08-96008 and with financial support from the Russian Ministry of Education and Science at the base part of the state task (Project No 01201460538).



а *б* *в*

Рис. 3. Экспериментальные и рассчитанные поперечные сечения сварных швов для различных режимов фокусировки:
а – перефокусированный; *б* – острый фокус; *в* – недофокусированный

References

1. Rai R., Palmer T. A., Elmer J. W., Debroy T. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy, *Welding Journal*, March 2009, Vol. 88, No. 3, P. 54–61.

2. Sudniky W., Radajz D. and Erofeew W. Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification, *Journal of Physics D: Applied Physics,* 1996, Vol. 29, No. 11, P. 2811–2817. Doi:10.1088/0022-3727/29/11/013.

3. Cho W.-I., Na S.-J., Thomy C., Vollertsen F. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, Vol. 212, Iss. 1, p. 262–275. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.09.011.

4. Trushnikov D., Belenkiy V., Schavlev V., Piskunov A., Abdulin A., Mladenov G. Plasma charge current for control and monitoring at electron beam welding with the beam oscillation, *Sensors*, 2012, Vol. 12(12), P. 17433–17445. Doi: 10.3390/s121217433.

5. Trushnikov D. N., Belen'kii V. Ya. Investigation of the formation of the secondary current signal in plasma in electron beam welding with oscillations of the electron beam, *Welding International*, 2013, Vol. 27, Iss. 11, P. 877–880. Doi: 10.1080/09507116.2013.796645.

6. Max J. *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques, 3rd ed.*; Jean-Louis Lacoume, Paris, France, 1981, Vol. I, P. 10–50.

7. Orfanidis S. J. *Optimum Signal Processing. An Introduction, 2nd ed.*; Prentice-Hall : Englewood Cliffs, NY, USA, 1996, P. 5–30.

8. Bachmann M., Avilov V., Gumenyuk A., Rethmeier M. Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, Vol. 214, Iss. 3, P. 578– 591. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.11.013.

9. Voller V. R., Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, Vol. 30, Iss. 8, P. 1709–1720. Doi: 10.1016/0017-9310(87)90317-6.

10. Brent A. D., Voller V. R., Reid K. J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal, *Numerical Heat Transfer*, 1988, Vol. 13, Iss. 3, P. 297–318. Doi: 10.1080/10407788808913615.

11. Zhang W., Kim C. H., DebRoy T. Heat and fluid flow in complex joints during gas-metal arc welding, Part I: Numerical model of fillet welding, *Journal of Applied Physics*, 2004, Vol. 95, Iss. 9, P. 5210–5219. Doi: 10.1063/1.1699485.

12. Kou S., Sun D. K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds, *Metalurgical Transactions A*, 1985, Vol. 16, Iss. 2, P. 203–213. Doi: 10.1007/BF02815302.

13. Kim C. H., Zhang W., DebRoy T. Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas metal arc fillet welding, *Journal of Physics*, 2003, Vol. 94, Iss. 4, P. 2667–2679. Doi: 10.1063/1.1592012.

14. De A., DebRoy T. Probing unknown welding parameters from convective heat transfer calculation and multivariable optimization, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, Vol. 37, No. 1, P. 140–150. Doi: 10.1088/0022-3727/37/1/023.

15. De A., DebRoy T. A smart model to estimate effective thermal conductivity and viscosity in weld pool, *Journal of Applied Physics*, 2004, Vol. 95, Iss. 9, P. 5230–5240. Doi: 10.1063/1.1695593.

© Пермяков Г. Л., Трушников Д. Н.,
Беленький В. Я., Ольшанская Т. В., 2015

УДК 519.85

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 833–841

САМОКОНФИГУРИРУЕМЫЙ АНСАМБЛЬ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Е. А. Сопов*, С. С. Аплеснин

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

Задача мультимодальной оптимизации (ММО) заключается в нахождении множества всех глобальных и локальных оптимумов или аппроксимации этого множества. В последние годы было предложено множество эффективных бионических и эволюционных алгоритмов для ММО с вещественными переменными (в частности, на базе алгоритмов эволюционных стратегий, роя частиц (PSO), дифференциальной эволюции и др.). В то же время, многие практические задачи оптимизации часто содержат переменные нескольких разных типов, включая целочисленные, ранговые, бинарные и др. В таком случае переменные переводятся в наиболее слабую из шкал, обычно используется бинарное представление решений. К сожалению, сегодня достаточно эффективных подходов для ММО с бинарным представлением не предложено. Существующие решения в основном базируются на общих идеях метода ниш (niching). Более того, возникает проблема выбора подходящего алгоритма и тонкой настройки его параметров под конкретную задачу ММО. Предложен новый подход, основанный на метаэвристике для построения генетического алгоритма, включающего многие стратегии поиска. Предложенный подход позволяет управлять взаимодействием нескольких поисковых алгоритмов (разных генетических алгоритмов для ММО) и обеспечивает самоконфигурируемое решение задачи с априори неизвестной структурой (оптимизация «черного ящика»). Представлены результаты численных экспериментов и сравнение с другими известными подходами на множестве традиционных тестовых задач ММО и задачах, предложенных на конкурсе по ММО в рамках конференции CEC'2013. Предложенный подход демонстрирует эффективность лучшую, чем стандартные подходы, основанные на идее ниш, и сравнимую с современными усовершенствованными алгоритмами. Особенностью и преимуществом предложенного подхода является то, что он не требует привлечения дополнительных экспертных знаний, так как работает в автоматизированном, самоконфигурируемом режиме.

Ключевые слова: мультимодальная оптимизация, самоконфигурирование, генетический алгоритм, метаэвристика, метод ниш.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 833–841

SELF-CONFIGURING ENSEMBLE OF GENETIC ALGORITHMS FOR MULTIMODAL OPTIMIZATION PROBLEMS

E. A. Sopov*, S. S. Aplesnin

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: evgenysopov@gmail.com

Multimodal optimization (MMO) is the problem of finding a set of all global and local optima or a good approximation of that set. In recent years many efficient nature-inspired and evolutionary techniques (based on ES, PSO, DE and others) have been proposed for real-valued problems. At the same time, many real-world problems contain variables of many different types, including integer, rank, binary and others. In this case, the weakest representation (namely binary representation) is used. Unfortunately, there is a lack of efficient approaches for problems with binary representation. Existing techniques are usually based on general ideas of niching. Moreover, there exists the problem of choosing a suitable algorithm and fine tuning it for a certain problem. In this study, a novel approach based on a metaheuristic for designing multi-strategy genetic algorithm is proposed. The approach controls the interactions of many search techniques (different genetic algorithms for MMO) and leads to the self-configuring solving of problems with a priori unknown structure ("black-box" optimization). The results of numerical experiments and of comparison with other popular techniques for classical benchmark problems and benchmark problems from the CEC'2013 competition on MMO are presented. The proposed approach has demonstrated efficiency better than standard niching techniques and

comparable to modern advanced algorithms. The main feature and advantage of the approach is that it does not require the participation of the human-expert, because it operates in an automated, self-configuring way.

Keywords: multimodal optimization, self-configuration, genetic algorithm, metaheuristic, niching.

Введение. Многие прикладные задачи оптимизации имеют более одного оптимального решения, или существует один глобальный оптимум и множество локальных оптимумов в допустимой области пространства поиска. Такие задачи оптимизации называются многоэкстремальными или мультимодальными. Цель задачи мультимодальной оптимизации (ММО) – найти множество всех глобальных и локальных оптимумов или репрезентативную аппроксимацию этого множества.

Эволюционные алгоритмы (ЭА) в целом и генетические алгоритмы (ГА) в частности демонстрируют высокую эффективность для многих сложных задач оптимизации. ЭА и ГА эффективны и при решении многоэкстремальных задач, так как используют стохастический популяционный поиск вместо последовательного улучшения единственного решения. В то же время традиционные ЭА и ГА имеют тенденцию сходиться к лучшему найденному решению и теряют разнообразие популяции.

В последние годы задача ММО становится более полярной, было предложено множество эффективных бионических и эволюционных подходов для ММО. Практически все алгоритмы построены на идее поддержки разнообразия популяции, но отличаются способами исследования пространства поиска, обнаружения и идентификации областей притяжения оптимумов. На сегодняшний день большинство алгоритмов и наилучшие результаты получены для задач ММО с вещественными переменными [1]. Основная причина – лучшее понимание и использование свойств ландшафта целевой функции в вещественном пространстве поиска. В итоге, было разработано множество хорошо обоснованных эвристик.

К сожалению, многие практические задачи ММО обычно являются задачами типа «черного ящика», что затрудняет применение алгоритмов ММО. Более того, многие практические задачи оптимизации часто содержат переменные нескольких разных типов, включая целочисленные, ранговые, бинарные и др. В таком случае переменные переводятся в наиболее слабую из шкал, обычно используется бинарное представление решений. К сожалению, сегодня достаточно эффективных подходов для ММО с бинарным представлением не предложено. Существующие решения в основном базируются на общих идеях метода ниш (niching) и разделения пригодности (fitness sharing). Эвристики из эффективных алгоритмов для ММО с вещественным представлением решений не могут быть напрямую применены для задач с бинарным представлением из-за разности свойств вещественного и бинарного пространств поиска.

В данной работе предложен новый подход, основанный на метаэвристике для построения генетического алгоритма, включающего многие стратегии поиска. Основная идея – создать ансамбль из нескольких ММО-алгоритмов и адаптивно управлять их взаимодействием. Такой подход обеспечит самоконфигурируемое решение задач ММО с априори неизвестной структурой.

Состояние исследований в области ММО. Задача идентификации многих экстремумов существует с момента появления ЭА. В ранних работах особенности ММО учитывались для усиления стандартных ЭА и ГА при нахождении глобального оптимума в мультимодальной среде.

Сегодня задача ММО имеет как минимум 3 постановки [2]:

– поиск единственного (глобального) оптимума многоэкстремальной задачи;

– поиск всех глобальных оптимумов;

– поиск всех оптимумов (глобальных и локальных) или их репрезентативного подмножества.

Очевидно, что 2 и 3 постановки более интересны как с теоретической, так и практической точек зрения. Интерес к ММО в последнее десятилетие существенно повысился. Последние достижения в этой области в основном сфокусированы на задаче поиска многих оптимумов задачи, предложено большое количество различных эффективных эвристик. В 2013 году состоялся глобальный конкурс по ММО в рамках Международной конференции IEEE CEC'13 [3], где были сформулированы тестовые задачи, требования для сравнения эффективности алгоритмов ММО и представлены современные подходы к решению сложных задач ММО.

Список наиболее популярных и хорошо исследованных подходов включает [1; 4; 5]:

1) базовые эвристики:

– параллельный и последовательный метод ниш (niching);

– разделение пригодности (fitness sharing), метод «очистки» популяции (clearing) и метод ниш, основанный на кластеризации (cluster-based niching);

– контроль скопления (crowding);

– турнирная селекция с ограничением (restricted tournament selection (RTS));

– ограничение спаривания (mating restriction);

– сохранение особей (species conservation);

2) специальные подходы:

– метод ниш с локальным поиском (niching memetic algorithm);

– многонациональная модель ЭА (multinational EA);

– двухкритериальный ЭА для ММО (bi-objective MMO EA);

– ЭА для ММО с использованием кластеризации (clustering-based MMO EA);

– популяционный метод ниш (population-based niching);

– топологические алгоритмы (topological algorithms);

3) другие бионические алгоритмы, модифицированные для решения задач ММО: метод роя частиц

(PSO), эволюционные стратегии (ES), дифференциальная эволюция (DE), алгоритм муравьиной колонии (ant colony optimization) и др.

Примечание. Далее в статье будут использоваться оригинальные названия подходов и алгоритмов и их специфичных параметров на английском языке, так как не все названия имеют компактный перевод, сохраняющий исходный смысл, а общепринятой терминологии на русском языке пока нет.

Бинарные и бинаризованные задачи ММО обычно решаются с помощью ГА, использующих базовые эвристики. Некоторые специальные подходы применяются, но часто их свойства в бинарном пространстве поиска теряются. К сожалению, многие эффективные бионические алгоритмы для ММО не имеют бинарной модификации и не могут быть без потерь преобразованы для задач с бинарным представлением решений.

Исследования в области ММО показывают, что на текущий момент не предложено универсального подхода, который бы эффективно справлялся с произвольными (или хотя бы многими) задачами ММО. Многие исследователи предпочитают разрабатывать гибридные схемы, которые объединяют поисковые алгоритмы и различные эвристики для улучшения метода ниш. В качестве примера можно привести 4 алгоритма-победителя с конкурса по ММО CEC'13:

– Niching the CMA-ES via Nearest-Better Clustering (NEA2);

– A Dynamic Archive Niching Differential Evolution algorithm (dADE/nrand/1;

– CMA-ES with simple archive (CMA-ES);

– Niching Variable Mesh Optimization algorithm (N-VMO) [6].

Другой подход – комбинация многих ММО-алгоритмов, которые решают задачу параллельно, обмениваются индивидами и обобщают результаты. В [7] применяется островная модель, в которой острова итеративно переопределяются в зависимости от генетической близости индивидов. В [8] четыре алгоритма на базе метода ниш работают параллельно и производят потомков, которые собираются в общий пул для реализации шага замещения. В [9] аналогичная схема реализована с алгоритмом «очистки».

Концепция проектирования алгоритма ММО в виде ансамбля является весьма перспективной. Метаэвристика, которая включает различные подходы для ММО (различные стратегии поиска), должна справляться с различными типами задач ММО. Такая метаэвристика может быть самоконфигурируемой за счет адаптивного управления взаимодействием алгоритмов в процессе работы.

В [10] был предложен самоконфигурируемый генетический алгоритм на базе многих стратегий поиска, являющийся гибридом островной модели конкурирующей и кооперационной коэволюции. Подход основан на параллельной и независимой работе многих различных ГА, реализующих различные стратегии поиска. Такой подход позволяет решать задачи оптимизации с различными свойствами (в рамках определенного класса задач). Подход продемонстрировал хорошие результаты для задач многокритериальной и нестационарной оптимизации.

Самоконфигурируемый ансамбль ГА ММО. В области прикладной статистики и машинного обучения часто используется метод ансамблей алгоритмов для повышения надежности принятия решений. В среднем коллективное решение из частных решений многих алгоритмов дает лучшие результаты, чем полученные от них по отдельности. Эту концепцию можно применить и для бионических алгоритмов, и, в частности, для ГА. Основная идея – включить в ансамбль разные стратегии поиска и организовать эффективное управление их взаимодействием. Основная гипотеза – различные ГА учитывают различные особенности задач оптимизации и предназначены для преодоления различных трудностей в ходе работы. Вероятность того, что все ГА не справятся с некоторой ситуацией во время решения задачи, крайне низка. Более того, взаимодействие алгоритмов может обеспечить ансамбль новыми свойствами, которые отсутствуют у частных алгоритмов (синергетический эффект).

Структура самоконфигурируемого ГА на базе многих стратегий поиска, предложенного в [10], представлена на рис. 1. Общая схема метаэвристики обозначается как Self*GA, где символ звезды заменяется на ссылку на конкретный класс задач оптимизации при формировании коллектива ГА.

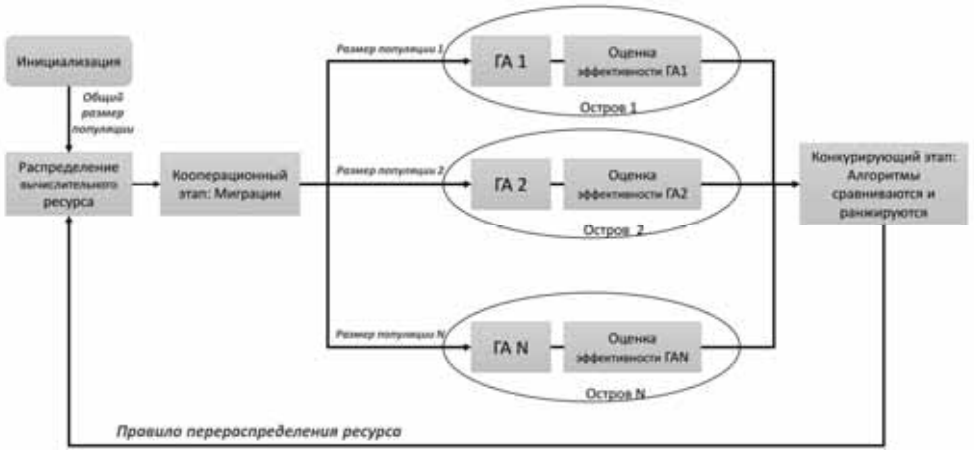


Рис. 1. Общая схема Self*GA

Общий размер популяции называется вычислительным ресурсом. Ресурс распределяется между алгоритмами, которые работают параллельно и независимо в течение определенного числа поколений (которое называется «период адаптации»). После распределения ресурсов каждый ГА в составе ансамбля имеет свою собственную популяцию, не пересекающуюся с популяциями других ГА. При инициализации все алгоритмы получают равные порции вычислительного ресурса. Эта концепция соответствует островной модели ГА, где каждый остров реализует свою собственную стратегию поиска.

По окончании адаптационного периода оцениваются показатели эффективности частных алгоритмов, алгоритмы ранжируются. ГА, показавшие более высокую эффективность, увеличивают свой вычислительный ресурс (размеры своих популяций) за счет менее эффективных алгоритмов. В то же время все алгоритмы имеют определенное количество ресурса, которое не перераспределяется, чтобы дать шанс менее эффективным алгоритмам проявить себя в будущем в других ситуациях. Эта концепция соответствует конкурирующей коэволюции.

Далее выполняются случайные миграции индивидов, чтобы уравнять стартовые позиции алгоритмов на следующий период адаптации. В зависимости от оптимизационной задачи, такие миграции могут быть детерминированные, основанные на операторе селекции или случайные. Эта концепция соответствует кооперативной коэволюции.

Данный подход позволяет избавиться от необходимости выбора подходящей стратегии поиска под конкретную задачу оптимизации, так как выбор лучших алгоритмов происходит автоматически в процессе поиска.

Аналогично можно построить ансамбль для задач ММО. Такой алгоритм может быть назван SelfMMOGA (ММО – multimodal optimization). На первом этапе определяются индивидуальные алгоритмы, включенные в состав ансамбля. В данной работе используются шесть базовых подходов, которые хорошо исследованы [1; 11] и могут применяться для задач с бинарным представлением. Мотивация такого выбора: если SelfMMOGA эффективен с ансамблем базовых алгоритмов, то в будущем алгоритм можно усилить более совершенными подходами.

Алгоритмы и их специфичные параметры представлены в табл. 1. Для значений параметров радиусов и расстояний используется метрика Хемминга для задач с бинарным представлением и евклидова метрика – для вещественных переменных.

Период адаптации является настраиваемым параметром алгоритма, его значение зависит от ограничений на вычислительный ресурс (число вычислений функции пригодности).

Важным моментом в любой коэволюционной схеме является способ оценки эффективности отдельных алгоритмов. Для задач ММО критерии должны включать оценку количества найденных оптимумов и то, как популяция распределена в пространстве поиска. К сожалению, хорошие метрики предложены только для тестовых задач ММО, в которых число оптимумов и их характеристики известны. Способы оценки эффективности для задач ММО, являющихся моделью «черного ящика», до сих пор обсуждаются. Некоторые рекомендации можно найти в [12]. В этой работе используются следующие критерии.

Первая метрика – BR (Basin Ratio) определяет число идентифицированных областей притяжения оптимумов, которые найдены общей популяцией (всеми индивидами всех алгоритмов). Метрика не требует предварительных знаний об оптимумах задачи, так как строится их аппроксимация в процессе работы. BR вычисляется следующим образом:

$$\mathrm{BR}(pop) = \frac{l}{k}, \tag{1}$$

$$l = \sum_{i=1}^{k} \min\left\{1, \sum_{\substack{x \in pop \\ x \neq z_i}} b(x, z_i)\right\},$$

$$b(x,z) = \begin{cases} 1, if\ x \in basin(z) \\ 0, otherwise \end{cases},$$

где pop – популяция оцениваемого ГА; k – число идентифицированных областей притяжения; l – индикатор покрытия области притяжения алгоритмом; b – функция, определяющая попадание индивида в область притяжения оптимума.

Для использования метрики (1) необходимо выбрать способ идентификации областей притяжения оптимумов и определить функцию $b(x,z)$.

Таблица 1

Алгоритмы в составе SelfMMOGA и их параметры

Обозначение	Алгоритм	Параметры
Alg1	Clearing	Clearing radius, Capacity of a niche
Alg2	Sharing	Niche radius, α
Alg3	Clustering	Number of clusters, min distance to centroid, max distance to centroid
Alg4	Restricted Tournament Selection (RTS)	Window size
Alg5	Deterministic Crowding	–
Alg6	Probabilistic Crowding	–

Для вещественных задач ММО области притяжения могут быть определены с помощью различных процедур кластеризации, например, алгоритмов Джависа–Патрика, ближайшего–лучшего и др. [13]. В данной работе для задач ММО с бинарным представлением используется следующий подход. Используется общая популяция (объединение популяций всех алгоритмов SelfMMOGA). Для каждого индивида рассматривается предопределенное количество S его ближайших соседей (в метрике Хемминга). Если пригодность выбранного индивида лучше, он помечается как локальный оптимум и центр идентифицированной области притяжения. Число ближайших соседей является настраиваемым параметром. Для прикладных задач значение может выбираться из практических соображений. Псевдокод процедуры имеет следующий вид:

```
Z=∅;
for all (x ∈ общая_популяция)
{
   for i=1,..,S
      yi=ближайший_сосед(x);
   if (fitness(x) > fitness(yi)) for all yi
   {
      Z=Z+x;
   };
};
```

Функция $b(x,z)$ определяет, находится ли индивид x в предопределенном радиусе относительно центра области притяжения z. Радиус является настраиваемым параметром. В данной работе радиус определяется как

$$radius = \frac{total\ population\ size}{k} \qquad (2)$$

где k – число идентифицированных областей притяжения ($k = |Z|$).

Вторая метрика – SDNN (Sum of Distances to Nearest Neighbour) определяется как сумма расстояний до ближайших соседей. Этот критерий не требует информации об оптимумах и областях притяжения и используется как штраф за потерю разнообразия (кластеризацию решений). Метрика SDNN может быть вычислена следующим образом:

$$\mathrm{SDNN}(pop) = \sum_{i=1}^{pop\,size} d_{nn}(x_i, pop), \qquad (3)$$

$$d_{nn}(x_i, pop) = \min_{y \in pop \setminus \{x\}} \{dist(x, y)\},$$

где d_{nn} – расстояние до ближайшего соседа; $dist$ – метрика Хемминга.

Метрики BR и SDNN объединяются в интегральный критерий K:

$$K = \alpha \cdot \mathrm{BR}(pop) + (1-\alpha) \cdot \overline{\mathrm{SDNN}}(pop), \qquad (4)$$

где $\overline{\mathrm{SDNN}}$ – нормализованное значение SDNN; α определяет вес частных критериев в сумме ($\alpha \in [0,1]$).

Далее необходимо определить схему перераспределения вычислительного ресурса: определяются размеры популяций каждого ГА на следующий период адаптации. В данной работе все алгоритмы отдают алгоритму-победителю заданный процент размера своих популяций с учетом минимально гарантированного значения ресурса, который не распределяется.

На кооперационной стадии во многих коэволюционных алгоритмах применяется схема, когда новый период адаптации начинается с одинаковых стартовых точек по принципу «лучшие вытесняют худших». Для задач ММО лучшие решения определяются идентифицированными локальными оптимумами. Поскольку аппроксимация множества оптимумов уже выполнена на предыдущих шагах (множество Z), индивиды из Z копируются в популяции частных алгоритмов, замещая наиболее близких к ним индивидов.

Критерии останова в SelfMMOGA такие же, как в стандартном ГА: ограничение на число вычислений целевой функции, число поколений без улучшений, стагнация и т. д.

Результаты численных экспериментов. Для оценки предложенного подхода использовались следующие наборы тестовых задач:

1. Шесть бинарных задач ММО, предложенных в [8]. Данные задачи основаны на функции подсчета единиц (the unitation functions) и являются существенно мультимодальными и десептивными.

2. Восемь вещественных задач ММО, предложенных на конкурсе по ММО в рамках международной конференции IEEE CEC'13 [6].

В табл. 2 представлены обозначения и некоторые детали тестовых задач.

Таблица 2

Набор тестовых задач

Обозначение задачи	Число оптимумов	Размерность задачи*
binaryF11	32 global	30
binaryF12	32 global	30
binaryF13	27 global	24
binaryF14	32 global	30
binaryF15	32 global	30
binaryF16	32 global	30
cecF1	2 global + 3 local	9, 12, 15, 19, 22
cecF2	5 global	4, 7, 10, 14 ,17
cecF3	1 global + 4 local	4, 7, 10, 14 ,17
cecF4	4 global	14, 22, 28, 34, 42
cecF5	2 global + 2 local	11, 17, 24, 31, 37
cecF6	18 global + 742 local	16, 22, 30, 36, 42
cecF7	36 global	14, 20, 28, 34, 40
cecF8	12 global	8, 14, 20, 28, 34

* Вещественные задачи предварительно были бинаризованы, используя стандартное бинарное кодирование с 5 уровнями точности.

Для оценки эффективности SelfMMOGA на тестовых задачах с вещественными переменными использованы следующие критерии:

– PR (Peak Ratio) – процент оптимумов, найденных алгоритмом (5);

– SR (Success Rate) – процент успешных запусков алгоритма, когда были найдены все оптимумы задачи:

$$\mathrm{PR} = \frac{\left|\left\{q \in Q \wedge d_{nn}(q, pop) \le \varepsilon\right\}\right|}{k}, \qquad (5)$$

где $Q = \{q_1, q_2, ..., q_k\}$ – множество всех известных оптимумов; ε – уровень точности.

Максимальное число вычислений целевой функции и уровни точности для вычисления PR – в соответствии с правилами конкурса CEC [6]. Число независимых запусков алгоритма – 50.

В случае бинарных задач уровни точности для PR не могут быть определены, поэтому необходимо найти конкретную точку в пространстве поиска. Критерий SR был заменен метрикой PD (Peak Distance), которая показывает среднее расстояние от известного оптимума до ближайшего индивида в популяции [12]:

$$\mathrm{PD} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} d_{nn}(q_i, pop). \qquad (6)$$

Для наглядного представления процесса управления взаимодействием ГА в SelfMMOGA был выбран и визуализирован произвольный запуск алгоритма на задаче cecF1. График изменения популяций (перераспределение ресурсов) показан на рис. 2. Общий размер популяции равен 200 индивидам, размер гарантированного ресурса – 10. Максимальное число поколений – 200, период адаптации – 10. Таким образом, на горизонтальной оси графика отмечено 20 периодов адаптации, на вертикальной – значение размера популяции каждого ГА.

Как мы видим, нет ни одного алгоритма, кто бы «выигрывал» все время. На первых двух периодах лучшую эффективность показали Alg2 (Sharing) и Alg1 (Clearing). Наибольшее количество ресурса получил Alg3 (Clustering) на 10-м периоде адаптации. На финальных этапах лучшие результаты показал Alg5 (Deterministic Crowding).

Результаты оценки эффективности SelfMMOGA на множестве задач с бинарным представлением представлены в табл. 3. Таблица содержит значения по метрикам PR, SR и PR, усредненным по 50 независимым запускам алгоритма. Результаты сравнены с результатами реализации ансамбля различных алгоритмов на основе метода ниш (ENA), предложенного в [8]. Оба алгоритма имели равное ограничение на максимальное число вычислений целевой функции, для алгоритма ENA в первоисточнике представлены только значения по метрике SR.

Настройки SelfMMOGA следующие:

– максимальное число вычислений целевой функции – 50 000 (как и у ENA);

– размер общей популяции (сумма размеров популяций всех ГА) – 200 (ENA использует 500);

– период адаптации – 10 поколений 25 раз;

– все стандартные параметры ГА являются самонастраиваемыми – используется идея, предложенная в [14].

Результаты показывают, что бинарные проблемы оказались не таким сложными для SelfMMOGA и ENA. Для более детального анализа в табл. 4 результаты работы SelfMMOGA сравнены с результатами каждого из его частных алгоритмов, реализованных по отдельности. Также вычислено среднее значение (столбец «Mean») по показателям 6 частных алгоритмов. Оценку среднего можно рассматривать как среднюю эффективность при случайном выборе алгоритма (из представленных 6). Такая оценка весьма полезна, так как в случае задач ММО, являющихся «черным ящиком», исследователь не имеет информации о задаче и, как следствие, не может выбрать подходящий ГА. Если эффективность SelfMMOGA оказывается выше средней эффективности алгоритмов в его составе, то выбор SelfMMOGA будет предпочтительнее.

Как видно из табл. 4, SelfMMOGA на бинарных задачах во всех случаях превосходит среднее значение. Более того, в задачах F15 и F16 ни один из частных алгоритмов не достиг значения SR, равного 1, но их ансамбль в SelfMMOGA показал максимальную эффективность.

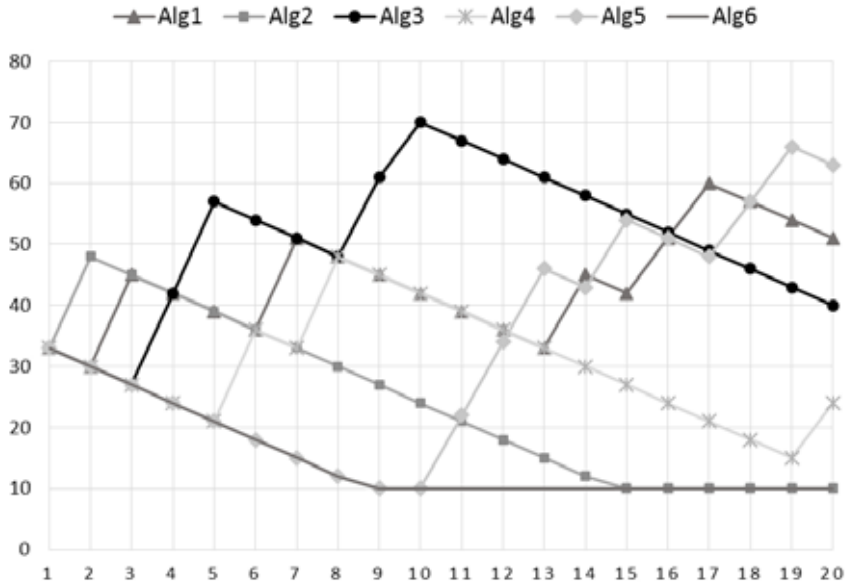


Рис. 2. Пример управления размером популяций в SelfMMOGA

Таблица 3

Результаты экспериментов на наборе бинарных задач

Задача	SelfMMOGA			ENA
	PR	SR	PD	SR
binaryF11	1,00	1,00	0,00	1,00
binaryF12	1,00	1,00	0,00	1,00
binaryF13	1,00	1,00	0,00	1,00
binaryF14	1,00	1,00	0,00	1,00
binaryF15	1,00	1,00	0,00	1,00
binaryF16	1,00	1,00	0,00	0,99

Таблица 4

Детализированные результаты экспериментов на наборе бинарных задач

	Alg1	Alg2	Alg3	Alg4	Alg5	Alg6	Mean	Self-MMOGA
Задача: binaryF11								
PR	0,94	0,84	0,91	1,00	0,97	0,78	0,91	1,00
SR	0,90	0,84	0,88	1,00	0,94	0,80	0,89	1,00
PD	2,40	3,37	2,40	0,00	2,33	3,30	2,30	0,00
Задача: binaryF12								
PR	0,97	0,97	1,00	1,00	0,97	0,84	0,96	1,00
SR	0,96	0,98	1,00	1,00	0,94	0,84	0,95	1,00
PD	2,00	1,00	0,00	0,00	1,67	3,62	1,38	0,00
Задача: binaryF13								
PR	1,00	0,96	0,96	0,93	0,96	0,89	0,95	1,00
SR	1,00	0,96	0,94	0,90	0,94	0,84	0,93	1,00
PD	0,00	2,50	2,67	2,80	2,67	3,37	2,34	0,00
Задача: binaryF14								
PR	0,91	0,81	0,91	1,00	0,94	0,75	0,89	1,00
SR	0,92	0,92	0,90	1,00	0,94	0,80	0,91	1,00
PD	3,25	2,50	2,60	0,00	2,67	3,20	2,37	0,00
Задача: binaryF15								
PR	0,88	0,88	0,84	0,88	0,88	0,72	0,84	1,00
SR	0,88	0,86	0,84	0,86	0,84	0,64	0,82	1,00
PD	2,33	2,57	2,62	2,71	2,37	3,06	2,61	0,00
Задача: binaryF16								
PR	0,84	0,75	0,84	0,88	0,78	0,56	0,78	1,00
SR	0,84	0,80	0,86	0,84	0,76	0,66	0,79	1,00
PD	3,25	2,80	3,00	2,87	3,08	3,47	3,08	0,00

Результаты оценки эффективности SelfMMOGA на вещественных задачах представлены в табл. 5–7. Табл. 5 содержит детальную информацию, табл. 6 демонстрирует показатели в сравнении с другими известными алгоритмами, в табл. 7 сравниваемые алгоритмы проранжированы по критериям.

Все критичные настройки и ограничения алгоритмов при решении задач определены правилами конкурса CEC'13. Для каждой задачи используются 5 уровней точности для определения попадания в область притяжения оптимума ($\varepsilon = \{1e\text{-}01, 1e\text{-}02, \ldots, 1e\text{-}05\}$). Таким образом, каждая задача была бинаризована 5 раз (размерности бинарного пространства поиска представлены в табл. 2).

Результаты работы SelfMMOGA сравнены с оценками эффективности других эффективных алгоритмов, представленных на конкурсе CEC'13: DE/nrand/1/bin and Crowding DE/rand/1/bin [6], N-VMO [15], dADE/nrand/1 [16] и PNA-NSGAII [17].

Таблица 5

Результаты экспериментов на наборе задач CEC'13

Уровень точности ε	cecF1		cecF2		cecF3		cecF4	
	PR	SR	PR	SR	PR	SR	PR	SR
1e-01	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1e-02	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1e-03	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1e-04	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1e-05	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,887	0,623
Уровень точности ε	cecF5		cecF6		cecF7		cecF8	
	PR	SR	PR	SR	PR	SR	PR	SR
1e-01	1,000	1,000	0,843	0,540	0,851	0,540	1,000	1,000
1e-02	1,000	1,000	0,834	0,536	0,792	0,223	1,000	1,000
1e-03	1,000	1,000	0,814	0,378	0,762	0,029	0,966	0,775
1e-04	1,000	1,000	0,560	0,140	0,731	0,000	0,964	0,753
1e-05	1,000	1,000	0,000	0,000	0,687	0,000	0,954	0,670

Таблица 6

Средние значения метрик

ε	SelfMMOGA		DE/nrand/1/bin		cDE/rand/1/bin		N-VMO		dADE/nrand/1		PNA-NSGAII	
	PR	SR	PR	SR	PR	SR	PR	SR	PR	SR	PR	SR
1e-01	0,962	0,885	0,850	0,750	0,963	0,875	1,000	1,000	0,998	0,938	0,945	0,875
1e-02	0,953	0,845	0,848	0,750	0,929	0,810	1,000	1,000	0,993	0,828	0,910	0,750
1e-03	0,943	0,773	0,848	0,748	0,847	0,718	0,986	0,813	0,984	0,788	0,906	0,748
1e-04	0,907	0,737	0,846	0,750	0,729	0,623	0,946	0,750	0,972	0,740	0,896	0,745
1e-05	0,816	0,662	0,792	0,750	0,642	0,505	0,847	0,708	0,835	0,628	0,811	0,678
Среднее	0,916	0,780	0,837	0,750	0,822	0,706	0,956	0,854	0,956	0,784	0,893	0,759

Таблица 7

Сравнение алгоритмов по отдельным критериям

Ранжирование по критерию PR	Алгоритм	Ранжирование по критерию SR	Алгоритм
1	N-VMO and dADE/nrand/1	1	N-VMO
2	SelfMMOGA	2	dADE/nrand/1
3	PNA-NSGAII	3	SelfMMOGA
4	DE/nrand/1/bin	4	PNA-NSGAII
5	cDE/rand/1/bin	5	DE/nrand/1/bin
–	–	6	cDE/rand/1/bin

Настройки SelfMMOGA следующие:

– максимальное число вычислений целевой функции – 50000 (для задач cecF1-cecF5) и 200000 (для cecF6-cecF8);

– размер общей популяции (сумма размеров популяций всех ГА) – 200;

– период адаптации – 10 поколений 25 раз (для задач cecF1–cecF5) и 25 поколений 40 раз (для cecF6–cecF8);

– все стандартные параметры ГА являются самонастраиваемыми.

Как видно из табл. 5–7, SelfMMOGA демонстрирует результаты, сравнимые с известными и хорошо исследованными подходами. Он уступает алгоритмам dADE/nrand/1 и N-VMO, но стоит отметить, что эти подходы заняли на конкурсе CEC'13 2 и 4 место соответственно. В то же время среднее значение эффективности близко к первым 2 алгоритмам, превосходит PNA-NSGAII, CrowdingDE и DE, которые заняли 7, 8 и 9 места на CEC'13.

В данной работе мы включили в алгоритм только 6 базовых подходов для ММО. Тем не менее, они демонстрируют высокую эффективность, благодаря коллективной работе в ансамбле. Главной особенностью предложенного подхода является то, что он работает в автоматизированном, самоконфигурируемом режиме. Поэтому SelfMMOGA является хорошей альтернативой при решении сложных задач ММО, являющихся моделью «черного ящика».

Заключение. В работе предложен новый ГА для ММО, названный SelfMMOGA. Он базируется на метаэвристике, использующей и адаптивно управляющей несколькими разными стратегиями поиска в задачах ММО. SelfMMOGA позволяет решать сложные задачи ММО, являющиеся моделями «черного ящика», так как не использует в явном виде априорную информацию о задаче и ее свойствах. Алгоритм использует бинарное представление решений, что позволяет применять его в практических приложениях с переменными произвольного типа (включая смешанные).

На данном этапе в SelfMMOGA были включены только 6 базовых подходов ММО, чтобы показать эффективность метаэвристики. Эффективность подхода

продемонстрирована на множестве тестовых задач с бинарными переменными и на задачах с вещественными переменными, представленным на глобальном конкурсе по ММО в рамках Международной конференции IEEE CEC'2013. Предложенный подход демонстрирует эффективность, сравнимую с другими известными алгоритмами.

Эксперименты показывают, что SelfMMOGA превосходит среднюю эффективность частных алгоритмов, включенных в его ансамбль. Это означает, что эффективность подхода в среднем выше, чем эффективность случайно выбранного ГА для ММО. Это свойство весьма важно для задач типа «черного ящика», так как исследователь не имеет возможности выбрать подходящий алгоритм и тонко настроить его параметры. SelfMMOGA же не требует участия эксперта и решает задачи ММО в автоматизированном, самоконфигурируемом режиме.

В дальнейших работах планируется исследовать работу SelfMMOGA с более сложными подходами в ансамбле.

Благодарности. Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (МК-3285.2015.9).

Acknowledgments. The research was supported by President of the Russian Federation grant (MK-3285.2015.9).

References

1. Das S., Maity S., Qub B.-Y. and Suganthan P. N. Real-parameter evolutionary multimodal optimization: a survey of the state-of-the art. Swarm and Evolutionary Computation 1, 2011, P. 71–88.

2. Preuss M. Tutorial on Multimodal Optimization. In the 13th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, PPSN 2014. Ljubljana, 2014.

3. Li X., Engelbrecht A. and Epitropakis M., Results of the 2013 IEEE CEC Competition on Niching Methods for Multimodal Optimization. Report presented at 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation Competition on: Niching Methods for Multimodal Optimization, 2013a.

4. Liu Y., Ling X., Shi Zh., Lv M., Fang. J. and Zhang L. A Survey on Particle Swarm Optimization Algorithms for Multimodal Function Optimization. *Journal of Software*, 2011, Vol. 6, No. 12, P. 2449–2455.

5. Deb K., Saha A. Finding Multiple Solutions for Multimodal Optimization Problems Using a Multi-Objective Evolutionary Approach. Proceedings of the 12th Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO 2010. ACM, New York, 2010, P. 447–454.

6. Li X., Engelbrecht A., Epitropakis M. G. Benchmark functions for CEC'2013 special session and competition on niching methods for multimodal function optimization. Evol. Comput. Mach. Learn. Group, RMIT University, Melbourne, VIC, Australia. Tech. Rep, 2013b.

7. Bessaou M., Petrowski A., Siarry P. Island Model Cooperating with Speciation for Multimodal Optimization. Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI, *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, Vol. 1917, P. 437–446.

8. Yu E. L., Suganthan P. N. Ensemble of niching algorithms. *Information Sciences*, 2010, Vol. 180, No. 15, P. 2815–2833.

9. Qu B., Liang J., Suganthan P.N., Chen T. Ensemble of Clearing Differential Evolution for Multi-modal Optimization. *Advances in Swarm Intelligence Lecture Notes in Computer Science*, 2012, Vol. 7331, P. 350–357.

10. Sopov E. A Self-configuring Metaheuristic for Control of Multi-Strategy Evolutionary Search. ICSI-CCI 2015, Part III, LNCS 9142. 2015, P. 29–37.

11. Singh G., Deb K. Comparison of multi-modal optimization algorithms based on evolutionary algorithms. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Seattle. 2006, P. 1305–1312.

12. Preuss M., Wessing S. Measuring multimodal optimization solution sets with a view to multiobjective techniques. EVOLVE – A Bridge between Probability, Set Oriented Numerics, and Evolutionary Computation IV. AISC, vol. 227, Springer, Heidelberg. 2013, P. 123–137.

13. Preuss M., Stoean C., Stoean R. Niching foundations: basin identification on fixed-property generated landscapes. Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, GECCO 2011. 2011, P. 837–844.

14. Semenkin E. S., Semenkina M. E. Self-configuring Genetic Algorithm with Modified Uniform Crossover Operator. Advances in Swarm Intelligence. Lecture Notes in Computer Science 7331. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2012, P. 414–421.

15. Molina D., Puris A., Bello R., Herrera F. Variable mesh optimization for the 2013 CEC special session niching methods for multimodal optimization. Proc. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'13). 2013, P. 87–94.

16. Epitropakis M. G., Li X., Burke E. K. A dynamic archive niching differential evolution algorithm for multimodal optimization. Proc. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'13). 2013, P. 79–86.

17. Bandaru S., Deb K. A parameterless-niching-assisted bi-objective approach to multimodal optimization. Proc. 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'13). 2013, P. 95–102.

© Сопов Е. А., Аплеснин С. С., 2015

УДК 519.87

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 842–848

МНОГОАГЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БАЗ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ

В. В. Становов*, С. С. Бежитский, Е. А. Бежитская, Е. А. Попов

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

Представлен многоагентный подход к организации коллектива оптимизаторов, основанный на встречах между агентами. В ходе оптимизационного процесса агенты обмениваются лучшими решениями, при этом лучшие агенты получают больше ресурсов в форме встреч. Среди агентов выбраны шесть генетических алгоритмов с различными операторами и три различных алгоритма роя частиц. Предложенный метод коллективного решения оптимизационных задач применен для формирования нечеткой базы правил. Нечеткая база правил состояла из фиксированного числа правил, для каждой переменной каждого правила функция принадлежности задавалась с помощью двух сигмоидальных функций. При этом кодируемыми параметрами были точки достижения сигмоидами 0 и 1, так что задача построения базы нечетких правил сводилась к задаче вещественной оптимизации. Число вещественных параметров при этом зависело от размерности классификационной задачи. Эффективность алгоритма сравнивалась с самонастраивающимся генетическим алгоритмом, решающим ту же задачу формирования нечеткой базы правил. При этом качество классификации оценивалось по величине точности, выборка разбивалась на обучающую и тестовую в соотношении 70 на 30. В качестве классификационных задач выбраны шесть задач с репозиторием KEEL и UCI, в их числе задачи кредитного скоринга, медицинской диагностики, распознавания банкнот и форм зёрен. Для сравнения также были выбраны два других метода классификации, в частности, машины опорных векторов (SVM) и ещё один метод формирования нечетких систем, в котором кодировались номера нечетких термов. По результатам тестирования можно отметить, что многоагентный алгоритм показал эффективность, сравнимую с другими методами при решении сложных оптимизационных задач.

Ключевые слова: эволюционные алгоритмы, алгоритмы роя частиц, нечеткая логика, машинное обучение, генетические нечеткие системы, классификация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 842–848

MULTIAGENT ALGORITHM FOR FUZZY RULE BASES DESIGN FOR CLASSIFICATION PROBLEM

V. V. Stanovov*, S. S. Bezhitskii, E. A. Bezhitskaya, E. A. Popov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru

In this article a multiagent approach for organizing an ensemble of optimizers, based on the meetings between algorithms is presented. During the optimization process the agents exchange with best solutions and better algorithms receive more resources in the form of meetings. Among agents the six genetic algorithms with different operators and three particle swarm optimizers have been selected. The proposed approach of ensemble-based optimization problems solving is applied to the problem of designing a fuzzy rule base. The fuzzy rule base consisted of a fixed number of rules, for every variable and every rule the membership function was defined with two sigmoidal functions. The encoded parameters were the points where sigmoids reached 0 and 1, so that the problem of designing a fuzzy rule base reduced to a real-valued optimization problem. The number of real-valued parameters depended on the dimension of the classification problem. The effectiveness of the algorithm was compared to the self-configured genetic algorithm, solving the same problem of designing a fuzzy rule base. The classification quality was estimated using the accuracy values; the sample was split with 70 and 30 ratio. As classification problems, six problems have been selected from KEEL and UCI repositories, including credit scoring problems, medical diagnostics problems, banknote recognition and seeds' forms. Two more classification methods have been selected for comparison, more precisely, support vector machines (SVM) and another fuzzy classification method, in which the term numbers were encoded. According to the testing results,

it should be mentioned that the multiagent algorithm has shown the effectiveness, comparable to other method when solving complex optimization problems.

Keywords: evolutionary algorithms, particle swarm optimization, fuzzy logic, machine learning, genetic fuzzy systems, classification.

Введение. На сегодняшний день одним из популярных методов машинного обучения являются системы на нечеткой логике. Однако формирование таких систем связано с решением сложных оптимизационных задач, характеризующихся большим числом переменных, а также наличием переменных различных типов, т. е. вещественных, целочисленных и бинарных. По этой причине для решения подобных оптимизационных задач используются эволюционные алгоритмы, в частности, генетический алгоритм (ГА) и его модификации.

Для формирования нечеткой базы правил необходимо определить нечеткие термы, т. е. положения нечетких множеств и их количество, номера классов, соответствующие каждому правилу, количество правил, а также номера нечетких термов, соответствующих каждой переменной в каждом правиле. В данной работе предлагается сведение всех приведенных задач к задачам вещественной оптимизации на единичном гиперкубе.

Такое представление задачи формирования базы правил позволяет использовать любые оптимизационные процедуры, способные решать задачи вещественной оптимизации. В частности, в данной работе для оптимизации был использован многоагентный алгоритм, комбинирующий несколько генетических алгоритмов и алгоритмов роя частиц (PSO). Многоагентный алгоритм основан на идее встреч между подпопуляциями, в ходе которых они могут обмениваться лучшими решениями. По окончании встреч агенты работают некоторое время независимо, пытаясь улучшить решения. Те агенты, чей ресурс (количество доступных встреч) заканчивается, выбывают из оптимизационной процедуры.

Многоагентый алгоритм оптимизации был сравнен по эффективности с самоконфигурируемым генетическим алгоритмом, который ранее использовался для решения данной задачи.

Остальная часть статьи организована следующим образом: «Теоретический анализ» содержит описание методики представления нечетких баз правил и формулировку задачи опимизации, а также описание самоконфигурируемого ГА и многоагентного алгоритма; «Методология» содержит описание методологии реализации и тестирования алгоритмов; «Экспериментальная часть» содержит список задач и результаты работы алгоритмов, а также их анализ; в заключение приведен список использованной литературы.

Теоретический анализ. Классификация объектов состоит в приписывании объекту F-мерного пространства R^F некоторого класса C_j из заранее заданного множества $C = \{C_1, ..., C_k\}$. Пусть $X = \{X_1, ..., X_F\}$ – набор входных переменных задачи, а U_f, $f = 1, ..., F$, – область определения f-й переменной. Для каждой переменной каждого правила задается нечеткое множество $A_{f,m}$, $f = 1, ..., F$; $m = 1, ..., M$, где M – число правил.

Нечеткое правило R_m, $m = 1, ..., M$, обычно имеет вид

$$R_m : \text{ĹŃËČ } X_1 \text{ ýňî } A_{1,m} \text{ č } ... \text{ č } X_F \text{ ýňî } A_{F,m} \text{ ŇÎ } Y \text{ ýňî } C_m,$$

где Y – выход, $C_m \in \boldsymbol{C}$ – номер класса для m-го правила, а $j_{m,f} \in [1, T_f]$ – это номер нечеткого множества из разбиения P_f, выбранный для переменной X_f.

Зададим для каждой переменной в каждом правиле базы по две функции, описывающие степени принадлежности сигмоидального типа. Зададим сигмоидальную функцию таким образом, чтобы она имела 3 аргумента x, y и z. Здесь x – текущее значение переменной, y – положение на оси X, в котором функция принимает нулевое значение, z – положение на оси X, в котором функция принимает единичное значение. Концы функции округлены до 0 и 1 после y и z. Функции представляются формулой

$$s(x,y,z) = \begin{cases} 1, \text{ Íńëč } (x \ge y \text{ č } y \ge z) \text{ čëč } (x \le y \text{ č } z > y), \\ 0, \text{ Íńëč } (x \le z \text{ č } y \ge z) \text{ čëč } (x \ge y \text{ č } z > y), \\ \dfrac{1}{1 + e^{\frac{-c}{y-z}\left(x + \frac{z-y}{2} - \min(y,z)\right)}}, \text{ Íńëč } y > x > z, \\ \dfrac{1}{1 + e^{\frac{-c}{y-z}\left(x - \frac{z-y}{2} - \min(y,z)\right)}}, \text{ Íńëč } z > x > y, \end{cases}$$

$$\text{Íńëč } y = z, \text{ ňî } y = y + \frac{k}{c}; \; z = z - \frac{k}{c}.$$

Константы имеют значения $c = 15$, $k = 0{,}1$. Пример двух таких функций представлен на рис. 1.

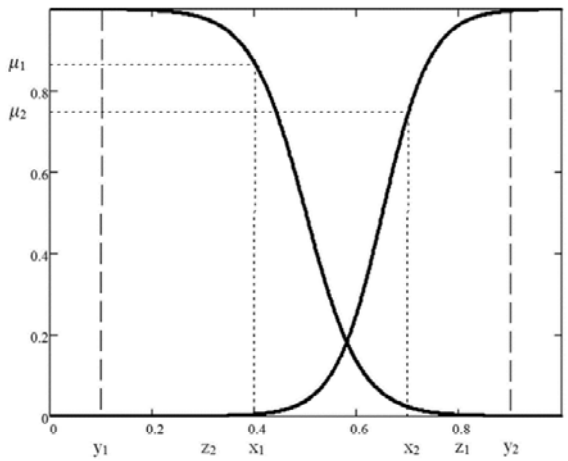


Рис. 1. Сигмоидальные функции

Функция была модифицирована для того, чтобы избежать необходимости решения задачи условной

оптимизации, так как значения y и z лежат в области определения переменной и могут быть использованы напрямую в алгоритме оптимизации.

Пара функций для каждой из переменных кодирует единственный нечеткий терм для конкретной переменной конкретного правила. Однако различные комбинации положений сигмоидальных функций позволяют получать всевозможные формы нечетких термов, обычно недостижимые при использовании других алгоритмов. При этом в процедуре нечеткого вывода используется минимум из значений двух функций принадлежности. Примеры возможных вариантов расположения двух сигмоидальных функций и соответствующие формы нечетких множеств (выделены жирным) представлены на рис. 2.

Как можно видеть, комбинация двух сигмоид позволяет получать классические формы нечетких термов, как, например, варианты 3, 4, 6, так и такие редко используемые формы, как 1 или 5.

Вариант 2 ($\mu = \min(s(x_1, y_1, z_1),\ s(x_2, y_2, z_2)) = 0$ для всех x) представляет особый интерес, так как в этом случае при любом значении переменной процедура нечеткого вывода будет получать нулевое значение функции принадлежности. Этот вариант в алгоритме рассматривается как игнорирование значений переменной, и в этом случае возвращаемое значение степени принадлежности равно единице.

В данном алгоритме также используется определение номера класса по принципу правила-победителя. В общем виде эту процедуру можно записать следующим образом:

$$R = \arg\max_{i \in M} \left\{ \min_{j \in F} \left\{ \min(s(X_j, y^1_{i,j}, z^1_{i,j}), s(X_j, y^2_{i,j}, z^2_{i,j})) \right\} \right\},$$

где M – число правил; F – число переменных в задаче.

Для задания нечеткой базы правил кодируются значения y^1, z^1, y^2, z^2 для каждой переменой каждого терма, таким образом, общее число переменных равно $4 \cdot N \cdot M$. Стоит отметить, что в этом подходе не используется некоторый общий набор функций принадлежности, каждое правило получает свою комбинацию сигмоид. Номер класса кодируется отдельно для каждого правила, так что итоговое число переменных в задаче равно $4 \cdot N \cdot M + M$. Для кодирования номера правила используется округление в сторону ближайшего номера класса. К примеру, для 3 классов диапазон изменения переменной, кодирующей класс, задается равным [0,1], при этом значения от 0 до 0,333 означают первый класс, от 0,333 до 0,666 – второй, от 0,666 до 1 – третий. Подробнее о методах комбинирования генетических алгоритмов и нечетких систем можно узнать в [1].

При использовании генетического алгоритма для оптимизации нечеткой базы правил использовался метод самонастройки, описанный в [2; 3]. Сам генетический алгоритм использовал три типа селекции (пропорциональная, ранговая, турнирная с размером турнира 2), три типа скрещивания (одноточечное, двухточечное, равномерное) и три типа мутации (слабая, средняя, сильная). Ниже приведено краткое описание метода самонастройки.

Примененный метод самонастройки основывается на поощрении того оператора, который доставил наибольшую суммарную пригодность на данном поколении. Пусть z – число различных операторов i-го типа. Начальные значения вероятностей устанавливаются $p_i = 1/z$. Оценка эффективности каждого оператора каждого типа производится на основании усредненных значений пригодности:

$$AvgFit_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} f_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} 1}, i = 1,\ 2,\ ...,\ z,$$

где n_i – количество потомков, в формировании которых принял участие i-й тип оператора; f_{ij} – пригодность j-го потомка, построенного с помощью i-го оператора; $AvgFit_i$ – средняя пригодность решений, построенных при помощи i-го оператора.

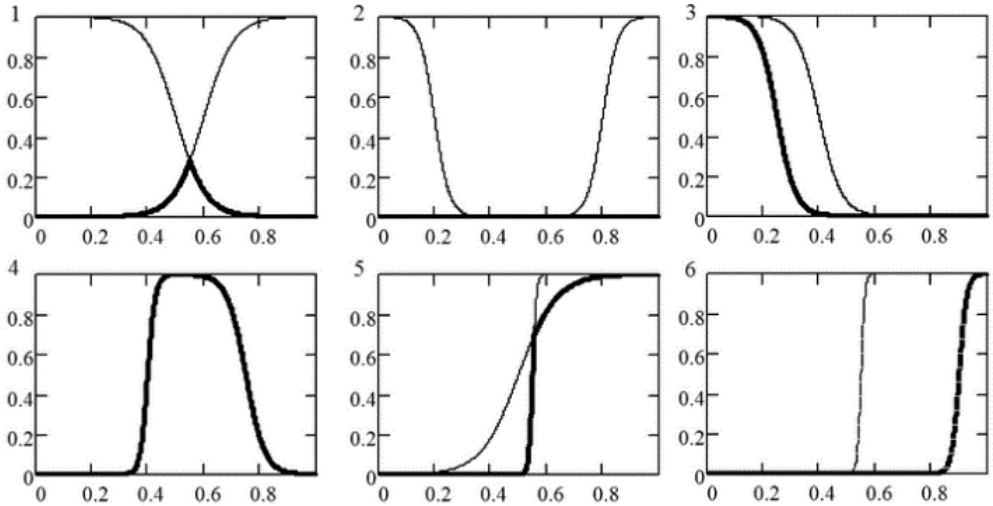


Рис. 2. Примеры возможных форм нечетких термов, получаемых при комбинации сигмоидальных функций

После этого вероятность применения оператора, чье значение $AvgFit_i$ является наибольшим среди всех операторов такого типа, увеличивается на $(z \cdot K–K)/(z \cdot N)$, а вероятности применения остальных операторов уменьшаются на $K/(z \cdot N)$, где N – заданное максимальное число поколений генетического алгоритма; K – константа, её значение устанавливалось равным 0,5.

Многоагентный алгоритм, использованный в данной работе, был реализован с учетом идей, описанных в [4] и [5]. Агентами в многоагентном алгоритме являются несколько генетических алгоритмов [6] и алгоритмов PSO.

Группа генетических агентов:

1) GA1 – турнирная селекция, побитовое скрещивание, сильная мутация;

2) GA2 – турнирная селекция, равномерное скрещивание, средняя мутация;

3) GA3 – пропорциональная селекция, двухточечное скрещивание, сильная мутация;

4) GA4 – пропорциональная селекция, побитовое скрещивание, сильная мутация;

5) GA5 – ранговая селекция, равномерное скрещивание, слабая мутация;

6) GA6 – ранговая селекция, побитовое скрещивание, сильная мутация.

Группа агентов PSO состоит:

– PSO1 – канонический PSO (c1 = c2 = 1,49, w = 0,7298) [7];

– PSO2 – FIPS [8];

– PSO3 – модифицированный канонический PSO (c1 = c2 = 1,49, w_i = random(0;1)), в котором инерция скорости – случайное индивидуальное для каждого агента число в диапазоне от 0 до 1.

Параметры агентов были одинаковыми во всех рассматриваемых задачах поисковой оптимизации. Алгоритм останавливал работу, как только достигался предел числа вычислений целевой функций, установленный для каждой задачи.

Ключевыми характеристиками агентов являются взаимодействие, время жизни и борьба за ресурсы. Поясним идею функционирования агентов. Ресурсами являются количество контактов или встреч (взаимодействия) агентов. Число встреч задается пользователем многоагентной системы. Каждая встреча представляет собой обмен опытом между агентами. Агенты встречаются парами. Пары формируются случайным образом. В каждой паре обмен опытом заключается в передаче менее удачному агенту лучшего решения от более удачного агента. Удачность агента характеризуется наличием у него лучшего решения, чем у оппонента при встрече. Следовательно, по результату встречи менее удачливый агент получает еще более лучшее решение, чем у него имеющиеся, но в обмен на решение вынужден поделиться имеющимся ресурсом, т. е. отдать одну возможную встречу. Таким образом, после расставания оба агента имеют выгоду, один получил более лучшее решение, а второй получил возможность еще дополнительной встречи в будущем, так как на текущей встрече ему улучшить свои решения не удалось. В случае, когда агенты встречаются и их лучшие решения одинаковы, число встреч сокращается на одну у обоих агентов, что говорит о бесполезном взаимодействии. Как правило, бесполезные встречи происходят к концу процесса поиска, когда значение целевой функции не удается улучшить, даже если агенты поделились своими лучшими решениями. Следовательно, время жизни агента зависит от того, насколько полезен он был в результате взаимодействия (обмена информацией) с другими агентами.

Экспериментальная часть. Качество классификации, полученное после обучения самоконфигурируемым и многоагентным алгоритмами, сравнивалось по значениям общей точности классификации. При этом выборка разбивалась на обучающую и тестовую в соотношении 70:30. Выполнялось 25 прогонов алгоритма для каждой задачи. Обучающая выборка нормировалась на интервале [0,1], на котором задавались сигмоидальные функции. Тестовая выборка нормировалась с использованием параметров нормировки, полученных для обучающей выборки.

Алгоритмы были реализованы на языке C++ в среде Embarcadero RAD Studio XE. Тестирование производилось на ноутбуке с процессором Intel Core i5-2410M (2 ядра, 2,3 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти.

Для тестирования было выбрано 6 задач с репозиториев UCI [9] и KEEL [10]. Среди них:

1) Banknote – задача об определении достоверности банкнот по изображениям;

2) Column 2c – задача классификации заболеваний позвоночника 2 класса;

3) Liver – задача о заболеваниях печени;

4) Seeds – задача классификации зёрен по их форме;

5) Austrlian credit – задача о подозрительных операциях с банковскими картами;

6) German credit – задача о классификации клиентов банка.

Для самоконфигурируемого генетического алгоритма устанавливались следующие параметры: число индивидов – 700, число поколений – 700, максимальное число правил – 10, минимальная вероятность применения операторов – 0,02. Для многоагентного алгоритма использовались следующие параметры: число индивидов в генетических алгоритмах – 78, число частиц в PSO – 78 (общее число решений – 702), число поколений/итераций до встречи – 10, начальный ресурс встреч – 200. Максимальное число вычислений функции пригодности ограничивалось величиной 490000.

Результаты сравнения алгоритмов представлены в табл. 1. Самоконфигурируемый генетический алгоритм обозначен SCGA, многоагентный алгоритм – Multi-agent. По результатам сравнения можно заключить, что на обучающей выборке ГА показывает лучшие результаты для 4 задач из 6, на одной задаче результаты практически неотличимы, и на одной задаче многоагентный алгоритм показывает лучшие результаты. При этом на тестовой выборке ГА показывает лучшие результаты лишь на 2 задачах из 6, причем отставание многоагентного алгоритма не столь значительно. На одной задаче многоагентный алгоритм превосходит по точности самоконфигурируемый ГА, на остальных трех задачах результаты статистически неотличимы.

Несмотря на то, что многоагентный алгоритм показывает худшие результаты в смысле общей точности, разница между точностью на обучающей и тестовой выборках для данного алгоритма меньше, что свидетельствует о том, что он меньше переобучается.

На рис. 3 приведен график изменения ресурсов агентов в многоагентном алгоритме.

В данном случае лучшим алгоритмом оказался GA2, хорошие результаты показал также PSO1. Худшие результаты были продемонстрированы алгоритмом GA3, который терял ресурсы почти всегда. Остальные алгоритмы ведут борьбу за распределяемые ресурсы. Отметим, что это графики для конкретной задачи, для других задач графики могут быть другими и имена удачных и неудачных агентов тоже могут быть другими.

Для самонастраивающегося алгоритма в соответствии с методикой, разработанной в [11], построены графики изменения вероятностей применения операторов мутации для задачи German (рис. 4).

Как можно заметить, графики для многоагентного алгоритма и самонастраивающегося алгоритма отличаются. В частности, для самонастраивающегося некоторые из операторов оказываются эффективными на тех или иных этапах работы алгоритма, в то время как в многоагентном алгоритме изначальная тенденция по обмену встречами сохраняется на протяжении почти всего процесса оптимизации.

В табл. 2 представлено сравнение многоагентного и самонастраивающегося алгоритмов на тестовой выборке с другими методами машинного обучения. Для сравнения были выбраны машины опорных векторов (SVM), реализованные в среде Statistica 10. Выборка также разбивалась на обучающую и тестовую в соотношении 70:30, производилось 25 запусков. Также для сравнения приведен другой метод построения нечетких баз правил самоконфигурируемым генетическим алгоритмом, в котором кодируются номера нечетких термов (SCGA+FL2) [12].

Таблица 1

Сравнение точности классификации самоконфигурируемого и многоагентного алгоритма

Обучающая	Multi-agent	SCGA	Тестовая	Multi-agent	SCGA
Australian	0,893	**0,909**	Australian	**0,853**	**0,852**
Banknote	**1,000**	**0,999**	Banknote	**0,993**	**0,995**
Column_2c	**0,938**	0,931	Column_2c	**0,808**	**0,807**
Liver	0,701	**0,854**	Liver	**0,673**	0,629
German	0,753	**0,806**	German	0,701	**0,709**
Seeds	0,989	**0,992**	Seeds	0,906	**0,917**

Рис. 3. Пример изменения ресурсов агентов, задача German

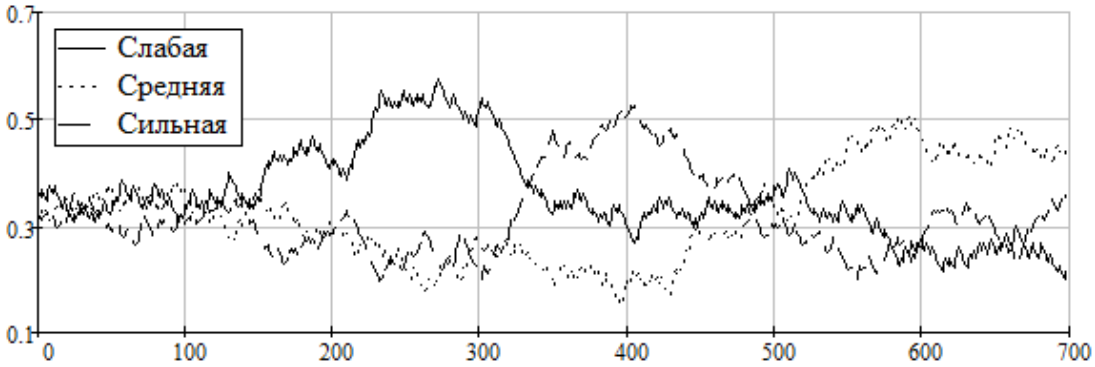


Рис. 4. Пример изменения вероятностей мутации в ГА, задача German

Таблица 2

Сравнение точности классификации с другими алгоритмами, тестовая выборка

Обучающая	Multi-agent	SCGA	SVM	SCGA+FL2
Australian	0,853	0,852	**0,864**	0,840
Banknote	0,993	**0,995**	0,987	0,942
Column_2c	**0,808**	**0,807**	0,784	0,777
Liver	0,673	0,629	**0,682**	0,568
German	0,701	0,709	**0,753**	0,707
Seeds	0,906	0,917	**0,968**	0,883

По результатам сравнения можно отметить, что машины опорных векторов показали лучшие результаты на большинстве задач. При этом на задачах Banknote и Column_2c разработанные алгоритмы показали лучшие результаты. Разница в точности классификации в основном обусловлена сложностью оптимизационной задачи построения нечеткой базы правил и, к тому же, не так уж и велика. Однако, хотя алгоритм SVM чаще показывает более высокую точность, необходимо отдавать себе отчет, что он дает намного меньше информации о решаемой задаче, чем предложенный в данной работе подход. SVM дает лишь вычислительную процедуру [13], а предложенный подход генерирует базу лингвистических правил, которая может быть интерпретирована человеком-экспертом и, тем самым, дать новые и полезные знания о причинно-следственных связях в анализируемых данных [14], чего SVM дать не могут. Незначительное снижение численной точности решений объясняется тем, что предложенным в данной работе алгоритмам выделены равные с более простыми алгоритмами вычислительные ресурсы, хотя с их помощью из базы данных извлекается намного больше информации. Более показательным является тот факт, что предложенным в данной работе подходом генерируются базы лингвистических правил, дающие более высокую точность классификации, чем базы лингвистических правил, полученные другими методами (т. е. SCGA+FL2).

Заключение. Развитие предложенного в данной работе подхода должно быть направлено на расширение возможности применения алгоритмов построения нечетких систем, в частности, использование их не только для проектирования классификаторов, но и для автоматического построения нечетких систем управления сложными объектами [15].

Благодарности. Работа поддержана грантом Президента РФ на 2014–2015 гг. (МК-5391.2014.9).

Acknowledgments. This work was supported by the grant of President of the Russian Federation for 2014–2015 (МК-5391.2014.9).

Библиографические ссылки

1. Genetic Fuzzy Systems. Evolutionary tuning and learning of fuzzy knowledge bases / O. Cordon [et al.] // Advances in Fuzzy Systems: Applications and Theory. World Scientific, 2001. 489 p.

2. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 7331 LNCS (PART 1). Pp. 414–421.

3. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic programming algorithm with modified uniform crossover // 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC. 2012. Pp. 1918–1923.

4. A Multi-Agent Genetic Algorithm for Global Numerical Optimization / W. Zhong [et al.] // IEEE Transactions on Cybernetics. 2004. 34(2). Pp. 1128–1141.

5. Akhmedova S., Semenkin E. Co-operation of biology related algorithms // 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC. 2013. Pp. 2207–2214.

6. Об эволюционных алгоритмах решения сложных задач оптимизации / А. В. Гуменникова [и др.] // Вестник СибГАУ. 2003. № 4. С. 14–24.

7. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space // IEEE Transaction on Evolutionary Computation. 2002. 6(1). Pp. 58–73.

8. Mendes R., Kennedy J., Neves J. The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2004. № 8 (3). Pp. 204–210.

9. Asuncion A., Newman D., UCI machine learning repository [Электронный ресурс] / University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences. 2007. URL: http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html.

10. KEEL: A software tool to assess evolutionary algorithms for data mining problems / J. Alcalá-Fdez [et al.] // Soft Comput. 2009. Vol. 13, no. 3. Pp. 307–318.

11. Semenkin E., Semenkina M. Empirical study of self-configuring genetic programming algorithm performance and behavior // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. 70 (1). 012004. Pp. 1–13.

12. Stanovov V. V., Semenkin E. S. Self-adjusted evolutionary algorithms based approach for automated design of fuzzy logic systems // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 148–152.

13. Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S. SVM-based classifier ensembles design with co-operative biology inspired algorithm // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 22–27.

14. Становов В. В., Семенкин Е. С. Самонастраивающийся эволюционный алгоритм проектирования баз нечетких правил для задач классификации // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57, № 3. С. 30–35.

15. Бежитский С. С., Семенкин Е. С., Семенкина О. Э. Гибридный эволюционный алгоритм для задач выбора эффективных вариантов систем управления // Автоматизация. Современные технологии. 2005. № 11. С. 24.

References

1. Cordon O., Herrera F., Hoffmann F., Magdalena L. Genetic Fuzzy Systems. Evolutionary tuning and learning of fuzzy knowledge bases. *Advances in Fuzzy Systems: Applications and Theory*, World Scientific, 2001, 489 p.

2. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7331 LNCS (PART 1), P. 414–421.

3. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic programming algorithm with modified uniform crossover. *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC* 2012, P. 1918–1923.

4. Zhong W., Lui J., Xue M., Jiao L. A Multi-Agent Genetic Algorithm for Global Numerical Optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2004, No. 34(2), P. 1128–1141.

5. Akhmedova S., Semenkin E. Co-operation of biology related algorithms. *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, CEC 2013, P. 2207–2214.

6. Gumennikova A. V., Emeljanova M. N., Semenkin E. S., Sopov E. A. [On evolutionary algorithms for solving complex optimization problems]. *Vestnik SibGAU*. 2003, No. 4, P. 14–24 (In Russ.).

7. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm–explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 2002, No. 6(1), P. 58–73.

8. Mendes R., Kennedy J., Neves J. The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2004, No. 8 (3), P. 204–210.

9. Asuncion A., Newman D. UCI machine learning repository. *University of California, Irvine, School of Information and Computer Sciences*, 2007, Available at: http://www.ics.uci.edu/~mlearn/MLRepository.html.

10. Alcalá-Fdez J., Sánchez L., Garcia S., del Jesus M. J., Ventura S., Garrell J. M., Otero J., Romero C., Bacardit J., Rivas V. M., Fernández J. C., Herrera F. KEEL: A software tool to assess evolutionary algorithms for data mining problems, *Soft Comput.*, 2009, Vol. 13, No. 3, P. 307–318.

11. Semenkin E., Semenkina M. Empirical study of self-configuring genetic programming algorithm performance and behavior. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2015, No. 70 (1), 012004, P. 1–13.

12. Stanovov V. V., Semenkin E. S. Self-adjusted evolutionary algorithms based approach for automated design of fuzzy logic systems. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 4 (50), P. 148–152 (In Russ.).

13. Akhmedova Sh. A., Semenkin E. S. SVM-based classifier ensembles design with co-operative biology inspired algorithm. *Vestnik SibGAU*, 2015, Vol. 16, No. 1, P. 22–27 (In Russ.).

14. Stanovov V. V., Semenkin E. S. [Self-configured evolutionary algorithm for designing fuzzy rule bases for classification problems]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2014, Iss. 57, No. 3, P. 30–35 (In Russ.).

15. Bezhitskiy S. S., Semenkin E. S., Semenkina O. J. [Hybrid evolutionary algorithm for the problems of selecting effective variants of control systems]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2005, No. 11, P. 24 (In Russ.).

© Становов В. В., Бежитский С. С.,
Бежитская Е. А., Попов Е. А., 2015

УДК 629.7.018.74

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 849–856

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УРОВНЕЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ РАЗРАБОТКИ АО «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»

Н. А. Тестоедов, С. Г. Кочура, И. А. Максимов*

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
*E-mail: maximov@iss-reshetnev.ru

Рассмотрены результаты натурных экспериментов по исследованию уровней воздействия космической среды на космические аппараты (КА), проводимых с помощью аппаратуры мониторинга, разработанной в кооперации с ведущими в данной области российскими НИИ. Анализ результатов эксплуатации КА отечественного и зарубежного производства показывает наличие значительной степени корреляции случаев аномальной работы КА с вариациями солнечной активности, геомагнитной возмущенностью космической среды, а также техногенными условиями эксплуатации КА. Структура и динамика этой техногенной среды, называемой собственной внешней атмосферой (СВА) космического аппарата, зависит как от особенностей конструкции и работы бортовых систем КА, так и от множества других факторов космического полета. Основным импульсным источником образования СВА является струя стационарных плазменных двигателей системы коррекции КА. Натурная эксплуатация КА происходит в структурных областях магнитосферы, заполненных плазмой, различающейся своими энергетическими характеристиками и концентрацией. КА разработки АО «ИСС» функционируют на нескольких типах орбит, пересекающих практически все области околоземного космического пространства. Кроме того, функционирование КА происходит в газовой среде, формирующейся за счет процессов газовыделения и сублимации конструкционных материалов КА, утечки газов из внутренних отсеков и работы различного оборудования КА. Данные проблемы становятся особо актуальными в связи с увеличением срока активного существования КА, усложнением и миниатюризацией бортовой аппаратуры, использованием в ее составе чувствительных полупроводниковых элементов высокой степени интеграции, увеличением энерговооруженности КА, увеличением числа и мощности приемо-передающих устройств. Следует также отметить, что информация об уровнях воздействия космической среды, получаемая с КА в режиме реального времени, крайне необходима при анализе аномальных ситуаций на борту КА и для принятия оперативных решений по их управлению.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая аппаратура, факторы космического пространства.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 849–856

SYSTEM FOR MONITORING THE LEVELS OF SPACE ENVIRONMENT EXPOSURE EXPERIENCED BY SATELLITES DEVELOPED BY "INFORMATION SATELLITE SYSTEMS" COMPANY

N. A. Testoedov, S. G. Kochura, I. A. Maximov*

JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
*E-mail: maximov@iss-reshetnev.ru

This article presents full-scale experimental results, which study how space environment levels influence spacecrafts. Such experiments were carried out with special monitoring equipment designed in cooperation with the specializing key Russian research institutes. Operation results analysis for Russian and non-Russian satellites show the presence of significant correlation between anomalous operation of satellites and variations of solar activity, geomagnetic disturbances of space environment and man-induced satellite operation conditions. The full-scale satellites operation is carried out in the magnetosphere structural areas filled with plasma, which vary in its energetic characteristics and concentration. ISS satellites operate in several orbit types covering almost all domains of near-Earth space. Also spacecraft operation performs in gas environment, caused by construction material gassing and sublimation process, inner modules gas leakage and equipment work. The structure and dynamics of this man-induced environment called satellite-surrounding atmosphere (SSA) depends on both peculiarities of satellite on-board systems' design and operation,

and on many other flight factors. Main pulse SSA source is stationary plasma thruster stream of the spacecraft correction system. Described problems are actual due to increased lifetime of satellites, increased complexity and miniaturization of on-board equipment based on LSI sensitive semiconductor elements, increased satellite power-to-weight ratio, increased number and power of receivers and transmitters. Also it's marked, that real-time information about spacecraft environment influence is especially necessary in case of anomalous on-board situations and for efficient spacecraft control.

Keywords: spacecraft, on-board equipment, space factors.

Введение. Спектр факторов, воздействующих на космический аппарат (КА) в процессе его орбитальной эксплуатации, чрезвычайно широк. В результате их воздействия, в материалах конструкции КА и элементах бортовой аппаратуры (БА) протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров, а также к возникновению аномальных ситуаций в работе БА и катастрофическим отказам бортовых систем КА.

Поэтому одной из основных проблем в области прикладной космофизики при создании и обеспечении надежного функционирования КА является проблема обеспечения его стойкости к воздействию факторов космического пространства и факторов техногенного характера.

Работы по исследованию влияния космической среды на КА в нашей стране под патронажем Роскосмоса и Российской академии наук проводятся уже несколько десятилетий. В АО «ИСС» имеется многолетний опыт мониторинга параметров космической среды, результатом которого является уточнение физики и механизмов воздействия космической среды на КА, разработка и отработка методов и средств защиты, применение которых позволяет обеспечить длительный срок активного существования разрабатываемых КА (до 15 лет). Работы проводятся в тесном сотрудничестве с ведущими в данной области российскими НИИ [1–15].

Основные этапы развития системы мониторинга. Основные этапы развития системы мониторинга влияния космической среды на КА разработки АО «ИСС» представлены в таблице.

Система мониторинга воздействия космической среды на КА разработки АО «ИСС»

Тип орбиты	Время проведения экспериментов	Регистрируемые параметры космической среды	Основные результаты исследований
Круговая, 1000 км	1968–1971 гг.	Потоки электронов и протонов	Уточнена модель радиационных поясов Земли, получены данные о планетарном распределении солнечных космических лучей (СКЛ)
Высокая эллиптическая орбита (ВЭО)	1968–1975 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза	
Геостационарная орбита (ГСО)	1976–1977 гг.	Датчики давления	Проведены измерения динамики изменения фонового давления вокруг КА
ГСО	1978 г.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка	Подтверждение гипотезы о влиянии на КА факторов электризации
ГСО	1983–1994 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка	Исследованы процессы формирования магнитосферной плазмы
	1990 г.	Электрические поля, помеховая обстановка на борту КА	Отработаны методы активной плазменной защиты КА от воздействия факторов электризации, в основном разработаны и внедрены пассивные методы и средства защиты от радиации и электризации
Круговая, 20 000 км	1983–1994 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, электрические поля, разности потенциалов, внешняя помеховая обстановка	Уточнена модель радиационных поясов Земли, определена физика воздействия протонов СКЛ на солнечные батареи, исследованы области проникновения СКЛ на данные высоты
	1993 г.	Электрические поля, помеховая обстановка на борту КА	Отработана и внедрена защита КА от разности потенциалов по системе энергопитания

Окончание таблицы

Тип орбиты	Время проведения экспериментов	Регистрируемые параметры космической среды	Основные результаты исследований
ГСО	1994–2000 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, разности потенциалов, наружная помеховая обстановка, потоки микрометеоритов	Получены закономерности вариации интенсивности потоков электронов и дозы в периоды магнитных бурь, выявлено влияние техногенных факторов на работоспособность БА (плазма двигательных установок, собственная атмосфера и т. д.)
ГСО	2000–2003 гг.	Потоки электронов и протонов, внутренняя и наружная помеховая обстановка, параметры плазмы и собственной атмосферы	Выявлено, что солнечная и геомагнитная активность вызывает значительные (на несколько порядков) непрогнозируемые изменения уровней радиационного воздействия, увеличение флуктуации геомагнитного поля. Начата разработка комплексной модели воздействия на КА факторов техногенного характера, разработка методов и средств защиты
ВЭО	2001–2003 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, помеховая обстановка	Проведены работы по уточнению модели космического пространства
Круговая, 20 000 км	2006–2015 гг.	Потоки электронов и протонов, поглощенная доза, электрические поля, разности потенциалов, внешняя помеховая обстановка	Проведено уточнение модели радиационных поясов Земли
	с 2017 г.	Потоки электронов и протонов, тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), поглощенная доза, электрические поля, внешняя помеховая обстановка, давление собственной внешней атмосферы (СВА) снаружи и внутри приборного отсека КА	Уточнение модели космического пространства и механизмов его воздействия на КА
ВЭО	с 2017 г.	Потоки электронов и протонов, ТЗЧ, поглощенная доза, помеховая обстановка внутри приборного отсека	Уточнение модели космического пространства и механизмов его воздействия на КА
ГСО	с 2017 г.	Поглощенная доза, помеховая обстановка, давление СВА внутри приборного отсека	Уточнение модели космического пространства и механизмов его воздействия на КА

Кроме того, АО «ИСС» принимало участие в следующих международных проектах по орбитальному исследованию космической среды совместно с Европейским космическим агентством (ESA): CEDRE (исследование механизма образования пленок загрязнения под воздействием космической среды) (1994–1995 гг.), GORID (измерение потоков микрометеоритов на ГСО) (1996–1997 гг.) и подготовка эксперимента DDE по исследованию внутренней зарядки КА (1998–1999 гг.).

Результаты натурных экспериментов. Очевидно, что основным показателем достаточности методов и средств защиты КА от воздействия космической среды, использованных на стадиях проектирования, изготовления и наземной экспериментальной подготовки, является его нормальное функционирование и бессбойное надежное выполнение своих целевых функций в процессе натурной эксплуатации. Однако при наличии случаев аномального функционирования бортовых систем появляется необходимость выявления их причин с целью разработки и применения дополнительных мер защиты.

Существует два способа идентификации аномального функционирования БА с уровнями воздействия факторов космического пространства. Первый из них основан на прогнозировании состояния плазменного окружения КА с помощью определения области магнитосферы, где в данный момент находится КА, а также диагностике магнитосферных возмущений в виде магнитосферных суббурь. Это является довольно сложной задачей, поскольку четкая привязка места нахождения КА в момент наблюдения аномальных ситуаций относительно структурных областей магнитосферы затруднена в связи с временной флуктуацией их границ, а также наличием переходных областей; диагностика же начала суббуревых возмущений в точке нахождения КА требует организации четкой службы разветвленной сети наземных станций наблюдения.

Второй способ является более предпочтительным в связи с его гораздо большей точностью и меньшими затратами. Он основан на использовании бортовой датчиковой диагностической аппаратуры контроля,

обеспечивающей измерение уровней воздействия космической среды на БА и КА. Необходимо отметить, что количественное определение эффективности примененных средств защиты в натурных условиях также возможно лишь с помощью бортовой аппаратуры контроля.

Описание основного состава датчиковой аппаратуры, предназначенной для мониторинга радиационной обстановки на орбите КА разработки АО «ИСС», в данной работе дается на основе комплектации аппаратуры контроля внешней среды (АКВС), установленной на КА «Глонасс». В состав АКВС входит блок детекторов, позволяющий получать информацию о пространственном и временном распределении потоков электронов и протонов радиационных поясов и солнечных космических лучей. Кроме того, в состав АКВС входит блок и датчики для измерения поглощенной дозы внутри приборного отсека, создаваемой различными видами ионизирующих излучений на траектории орбитального движения КА, а также блок и датчики контроля уровней зарядки, интенсивности разрядных процессов и помеховой обстановки.

На рис. 1 представлен временной ход потоков солнечных протонов, зарегистрированных на КА GOES-11 и «Глонасс» [15]. Для КА «Глонасс» приведены средние значения потоков, наблюдавшихся вне радиационных поясов. Пробелы в профилях данных КА «Глонасс» относятся к пролетам через радиационные пояса. Видно хорошее совпадение профилей на обоих спутниках.

Интенсивность зарядно-разрядных процессов, потенциал спутника и отдельных его изолированных частей можно определить, непосредственно исходя из прямых измерений напряженности электрического поля в различных точках на поверхности.

Наиболее общим параметром, сопровождающим электризацию и характеризующим уровни ее воздействия на КА, является напряженность электрического поля, которая однозначно связана с поверхностной плотностью заряда. Изменение напряженности электрического поля в разных точках КА позволяет оценить как средний потенциал его конструкции, так и неоднородность поверхностной зарядки КА. Кроме того, величина напряженности определяет вероятность возникновения электростатических разрядов [10].

Следствием электростатических разрядов являются высокочастотные помеховые сигналы, наводимые в бортовой кабельной сети и электронных схемах БА, которые могут вызвать сбои и отказы в работе БА и КА в целом. Еще одним параметром электризации, критичным для работоспособности КА, является наведение квазистатической разности потенциалов между изолированными частями конструкции КА.

Большинство приборов для измерения напряженности электрического поля основаны на явлении электростатической индукции. На этом принципе с учетом значительного дефицита массы и мощности был разработан малогабаритный датчик напряженности электрического поля вибрационного типа. Для измерения квазистатической разности потенциалов между шинами питания и корпусом КА использовался модифицированный датчик напряженности электрического поля. Для измерения интенсивности помех используются две разновидности регистраторов.

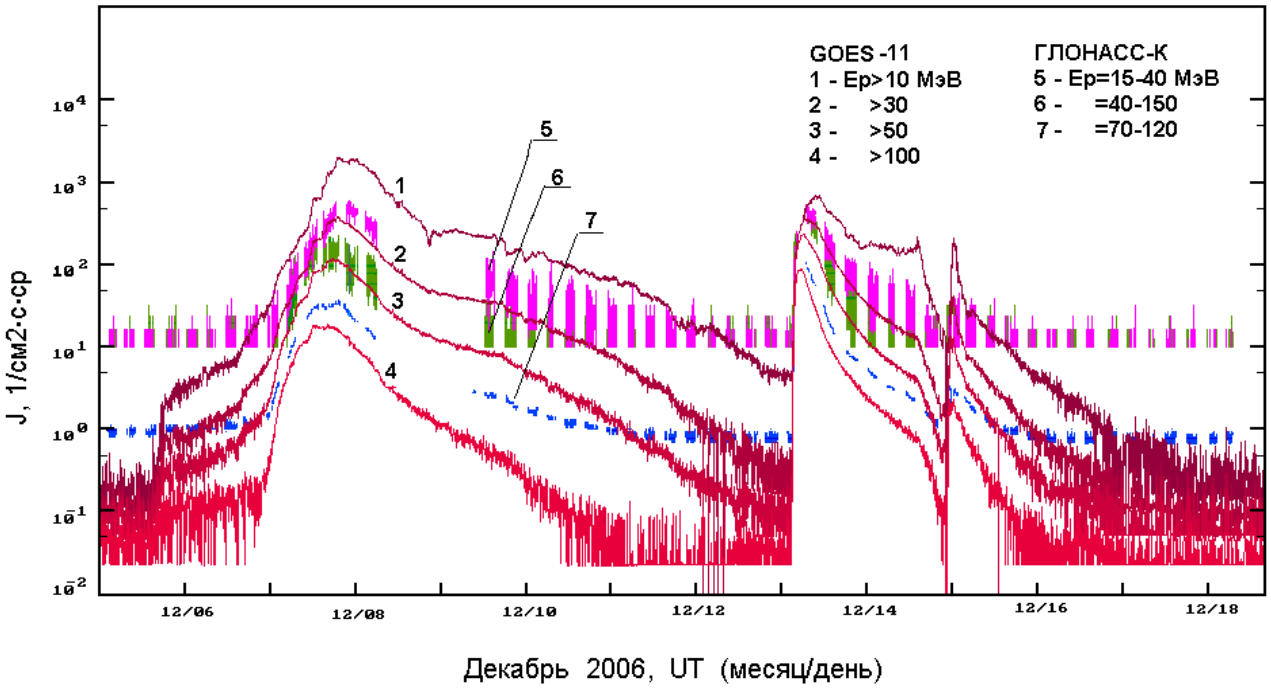


Рис. 1. Временной ход потоков солнечных протонов на КА «Глонасс-К» и GOES-11 за период 5–18 декабря 2006 г. (по оси ординат приведена плотность потоков солнечных протонов *J*, кривые 1–7 соответствуют плотности потоков протонов в различных диапазонах энергий)

Хорошим примером, демонстрирующим действенность использования разработанных датчиков электрического поля, являются результаты натурного эксперимента, проведенного на борту КА «Глонасс».

С целью сохранения работоспособности БА эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях. Необходимо отметить, что в период геомагнитных возмущений разность потенциалов между шинами питания и корпусом КА на круговой орбите достигала нескольких сотен вольт.

Эффективность включения фильтра хорошо иллюстрируется рис. 2, где показана типичная зависимость показаний датчика разности потенциалов до включения фильтра и после включения фильтра. На графике по оси ординат в логарифмическом масштабе приведены значения измеряемой разности потенциалов между шиной питания и корпусом КА.

Как видно из приведенного графика, в рассматриваемый период времени показания датчика разности потенциалов до включения фильтра составляли около 30 В. После включения фильтра показания датчика находились в диапазоне около 10 В и далее на протяжении всего времени наблюдений находились в этом пределе.

Основным моментом в проведении натурных экспериментов является постоянный длительный мониторинг радиационных уровней воздействия, на основании которого возможна корректировка используемых моделей воздействия.

На рис. 3 представлены данные о поглощенной дозе, накопленной дозиметрами на КА «Глонасс» за определенной защитой, с начала проведения мониторинга в 2007 году [16]. На верхней панели – индекс месячного числа солнечных пятен RI с начала космической эры; ниже – тот же индекс для периода мониторинга; еще ниже – суточные дозы с блоков радиометров дозы аппаратуры АКВС, далее – усреднённая по году суточная доза из предыдущей панели с пунктирными модельными уровнями, ниже – индексы Kp и Dst.

Рис. 3 свидетельствует, что модель хорошо учитывает верхние пределы наблюдаемых потоков, лишь в 2012 году измеренная среднегодовая доза вышла за уровень модели AE8-MAX. То, что доза в течение четырёх лет (с 2008 по 2011 гг.) находится около минимума и лежит ниже уровня AE8-MIN, объясняется уникально длинным минимум солнечной активности.

Заключение. Таким образом, можно констатировать, что уже при первых полетах искусственных спутников Земли были сформулированы два прикладных направления целевого использования системы мониторинга:

– уточнение условий эксплуатации КА;

– изучение механизмов и уровней воздействия космической среды на КА, совершенствование методов и средств защиты.

Российской космической отраслью накоплен богатейший опыт в проведении исследований факторов космического пространства и их влияния на бортовые системы КА. Так, за период с конца 1960-х годов до настоящего времени только АО «ИСС» в кооперации с ведущими отечественными НИИ подготовлены и проведены десятки натурных экспериментов, хронология и основные результаты которых приведены выше.

За это время был проведен огромный комплекс исследовательских и проектных работ, результатом чего явилось:

– определение типов и параметров дестабилизирующих факторов космического пространства, негативно влияющих на КА;

– уточнение моделей воздействия ионизирующего излучения космического пространства;

– выбор, создание и отработка датчиковой аппаратуры мониторинга;

– создание средств защиты от негативного воздействия факторов космической среды для КА.

Следует также отметить, что информация об уровнях воздействия космической среды, получаемая с КА в режиме реального времени, крайне необходима при анализе аномальных ситуаций на борту КА и для принятия оперативных решений по их управлению.

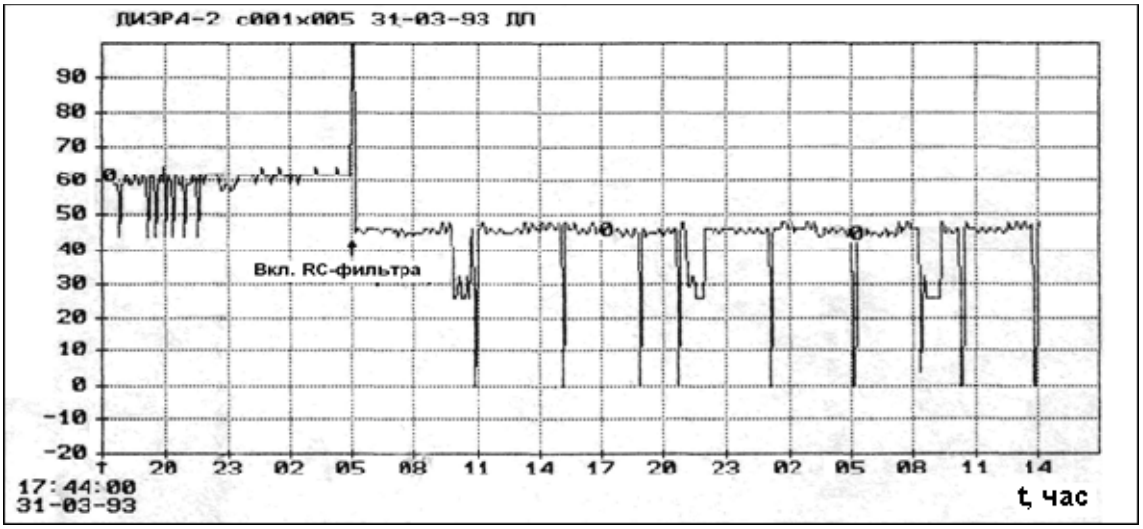


Рис. 2. Показания датчика разности потенциалов между шиной питания и корпусом КА, полученные в процессе натурного эксперимента на круговой орбите, проводимого с целью отработки эффективности средств защиты КА в виде RC-фильтра

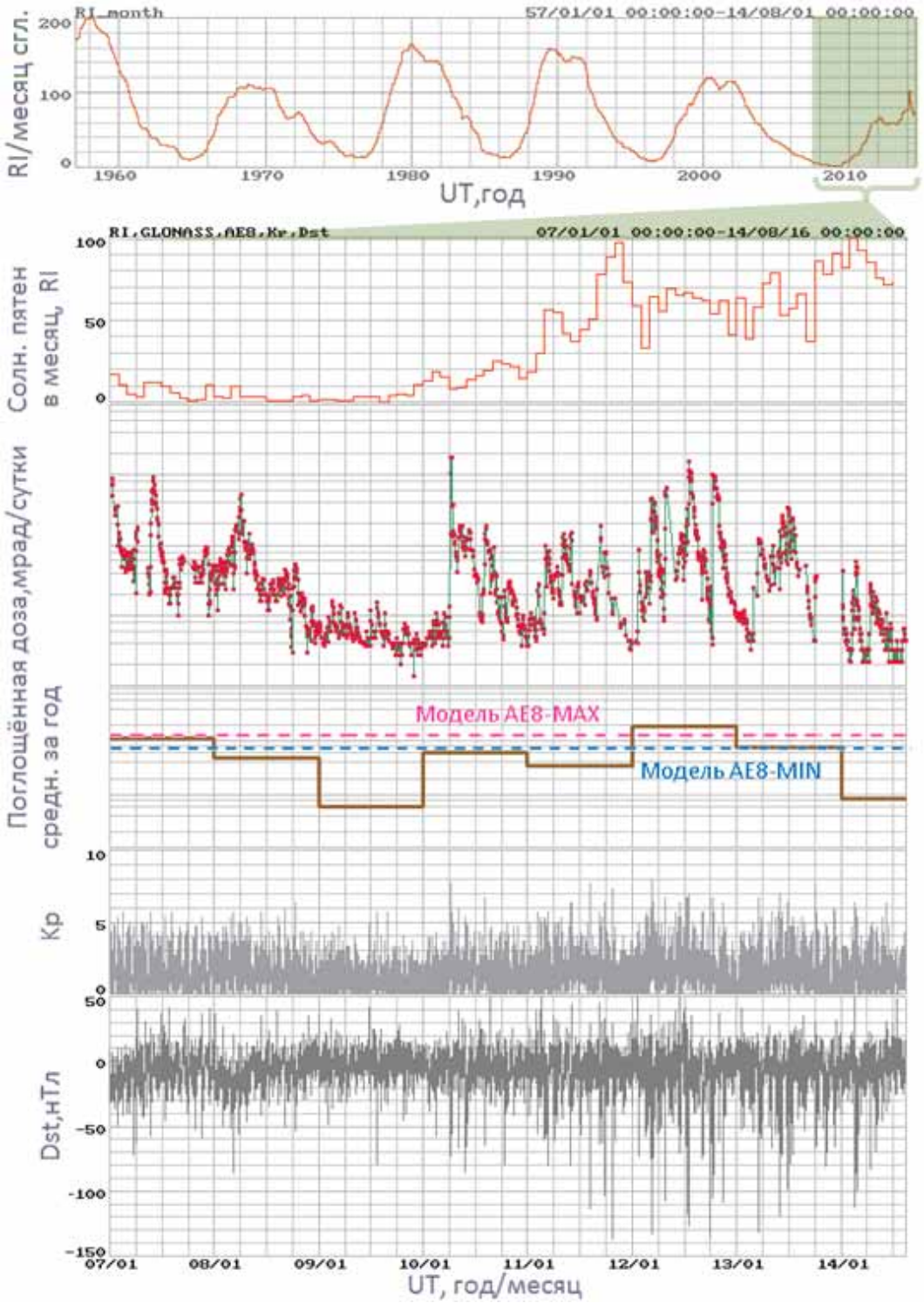


Рис. 3. Циклы солнечной активности (число солнечных пятен RI) (вверху); 7,5-летний ряд измерений радиационной дозы на КА «Глонасс» (внизу); индексы Kp и Dst (Kp-индекс – это планетарный индекс геомагнитной активности магнитосферы Земли, Dst-индекс представляет собой осесимметричную относительно геомагнитного диполя компоненту возмущенного магнитного поля и определяется на основе измерений магнитного поля на четырех приэкваториальных станциях)

Библиографические ссылки

1. Некоторые особенности динамики высокоэнергетических электронов на геостационарной орбите при различных межпланетных условиях / Н. Н. Павлов [и др.] // Моделирования космического излучения окружающей среды: новые явления и подходы. 1997. Т. 2. 143 с.

2. Измерения горячей плазмы магнитосферы на геостационарной орбите и зарядных эффектов / К. К. Крупников [и др.] // Моделирования окружающей среды для космических применений : тезисы симпо-

зиума Европейского космического агентства, ESTEC. 1996. С. 191–196.

3. Вариации спектров энергий ионов в суббури на геостационарной орбите / А. С. Ковтух [и др.] // Моделирования космического излучения окружающей среды: новые явления и подходы. 1997. Т. 2. 141 с.

4. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских КА связи, навигации и телевидения / Н. А. Власова [и др.] // Космические исследования. 1999. Т. 37, № 3. С. 245–255.

5. Мониторинг радиационной обстановки на высокоапогейных КА в максимуме 23-го цикла солнечной активности / Т. А. Иванова [и др.] // Физические проблемы экологии : материалы 3-й Всерос. науч. конф. в 6 ч. (22–24 мая 2001, г. Москва). С. 12–20.

6. Мониторинг радиационной обстановки на геостационарной орбите в максимуме 23-го цикла солнечной активности / Т. А. Иванова [и др.] // Физические проблемы экологии : материалы 3-й Всерос. науч. конф. в 6 ч. (22–24 мая 2001, г. Москва). С. 23–27.

7. Моделирование и мониторинг радиационной обстановки в магнитосфере Земли на высокоапогейных КА / Э. Н. Сосновец [и др.] // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2. С. 166–167.

8. Контроль радиационной обстановки на высокоапогейных КА / Н. А. Власова [и др.] // Электризация космических аппаратов и совершенствование их антистатической защиты как средства увеличения надежности и сроков активного существования : материалы межотраслевой науч.-техн. конф. (16–17 мая 2002, г. Королев). С. 65–66.

9. Моделирование и мониторинг радиационной обстановки в магнитосфере Земли на высокоапогейных космических аппаратах / Э. Н. Сосновец [и др.] // Солнечно-земная физика : материалы конференции по физике солнечно-земных связей: в 2 ч. (24–29 сент. 2001, г. Иркутск). С. 166–167.

10. Создание системы мониторинга внешних воздействующих факторов, возникающих в результате функционирования КА / Ю. М. Прокопьев [и др.] // Материалы IV Междунар. аэрокосмич. конгресса. 2003. С. 121.

11. Модель проникания плазменных образований, формируемых при работе электроракетных двигателей, в негерметичные приборные отсеки космических аппаратов / В. В. Иванов [и др.] // Авиация и космонавтика – 2006 : материалы Междунар. конф. (23–28 окт. 2006, г. Москва). С. 357.

12. Механизмы воздействия плазмы электроракетных двигателей на работу бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. В. Иванов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2007. № 3(16). С. 87–91.

13. Солнечные протоны и внешний радиационный пояс во время солнечных экстремальных событий декабря 2006 года / Н. Н. Веденкин [и др.] // Солнечные экстремальные явления : материалы Междунар. симпозиума (24–27 сент. 2007, г. Атенс, Греция). С. 33.

14. Моделирование процессов формирования СВА и загрязнения поверхности КА / А. Б. Надирадзе [и др.] // Модель Космоса. 2007. Изд 8, т. 8. С. 132.

15. Возрастания солнечных протонов и динамика внешнего радиационного пояса электронов во время солнечных экстремальных событий в декабре 2006 г. / Л. В. Тверская [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. С. 6–8.

16. Анализ данных с аппаратуры АКВС для определения уровней факторов космического пространства : науч.-техн. отчет. / АО «ИСС». МГУ, 2014. С. 196–198.

References

1. Pavlov N. N., Rubinstein I. A., Sosnovets E. N., Vlasova N. A., Verkhoturov V. I., Grafodatsky O. S., Maksimov I. A., Zolotukhin A. V., Zubarev A. I. [Some features of energetic electron dynamics at geostationary orbit under different interplanetary conditions]. *Modelirovaniya kosmicheskogo izlucheniya okruzhayushchey sredy: novye yavleniya i podkhody*, 1997, Vol. 2, 143 p.

2. Krupnikov K. K., Mileev V. N., Novikov L. S., Pavlov N. N., Sosnovets E. N., Teltsov M. V., Tverskoy B. A., Verkhoturov V. I., Grafodatsky O. S., Maksimov I. A. [Measurements of hot magnetospheric plasma at geostationary orbit and charging effects]. *ESA Symposium Proccedings on «Environment modeling for space-based applications*. ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1996, P. 191–196.

3. Kovtyukh A. S., Pavlov N. N., Rubinstein I. A., Sosnovets E. N., Teltsov M. V., Vlasova N. A., Grafodatsky O. S., Marjin B. V., Verkhoturov V. I., Maksimov I. A., Zolotukhin A. V., Zubarev A. I. [Substorm variations of ion energy spectra at geostationary orbit]. *Modelirovaniya kosmicheskogo izlucheniya okruzhayushchey sredy: novye yavleniya i podkhody*, 1997, Vol. 2, 141 p.

4. Vlasova N. A., Kutuzov Yu. V., Sosnovets E. N., Tverskaya L. V., Verkhoturov V. I., Grafodatskiy O. S., Maksimov I. A., Zolotukhin A. V. [The monitoring system of radiation conditions in the Earth's magnetosphere on the Russian spacecraft communication, navigation and TV]. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1999, Vol. 37, No. 3, P. 245–255 (In Russ.).

5. Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya., Rubinshteyn I. A., Sosnovets E. N., Tverskaya L. V., Tel'tsov M. V., Maksimov I. A., Balashov S. V., Khartov V. V., Zubarev A. I. [Radiation Monitoring the spacecraft into a high at the peak of the 23rd cycle of solar activity]. *Materialy 3 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: Fizicheskie problemy ekologii* [Proceedings of the 3rd Scientific Conference: Physical problems of ecology]. Moscow, 2001, P. 12–20 (In Russ.).

6. Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya., Rubinshteyn I. A., Sosnovets E. N., Tverskaya L. V., Tel'tsov M. V., Balashov S. V., Maksimov I. A., Khartov V. V., Zubarev A. I. [Monitoring of radiation situation in the geostationary orbit at the peak of the 23rd cycle of solar activity]. *Materialy 3 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: Fizicheskie problemy ekologii.* [Proceedings of the 3rd Scientific Conference: Physical problems of ecology]. Moscow, 2001, P. 23–27 (In Russ.).

7. Sosnovets E. N,, Panasyuk M. V., Tverskaya L. V., Khartov V. V., Maksimov I. A. [Modeling and monitoring of the radiation environment in Earth's magnetosphere into a Spacecraft]. *Solnechno-zemnaya fizika*, 2002, Iss. 2, P. 166–167 (In Russ.).

8. Vlasova N. A., Getselev I. V., Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya., Rubinshteyn I. A., Sosnovets E. N., Tverskaya L. V., Tel'tsov M. V., Balashov S. V., Ivanov V. V., Maksimov I. A., Khartov V. V. [Monitoring of radiation environment into a high Spacecraft]. *Materialy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: Elektrizatsiya kosmicheskikh apparatov i sovershenstvovanie ikh antistaticheskoy zashchity kak sredstva uvelicheniya nadezhnosti i srokov aktivnogo sushchestvovaniya.* [Proceedings of interdisciplinary scientific conference: The electrification of spacecraft and improving their antistatic protection as a means of increasing the reliability and Lifetime]. Korolev, 2002, P. 65–66 (In Russ.).

9. Sosnovets E. N., Panasyuk M. I., Vlasova N. A., Getselev I. V., Ivanova T. A., Pavlov N. N., Reyzman S. Ya., Rubinshteyn I. A., Tverskaya L. V., Maksimov I. A., Khartov V. V., Zubarev A. I., Pudovkin O. [Modeling and monitoring of the radiation environment in Earth's magnetosphere into a high-spacecraft]. *Materialy konferentsiya po fizike solnechno-zemnykh svyazey: Solnechno-zemnaya fizika*. [Proceedings of the conference on the physics of solar-terrestrial relations: Solar-Terrestrial Physics]. Irkutsk, 2001, P. 166–167 (In Russ.).

10. Prokop'ev Yu. M., Khartov V. V., Maksimov I. A. [Creating a system of monitoring external factors arising from the operation of the spacecraft]. *Materialy Chetvertogo mezhdunarodnogo aerokosmicheskogo kongressa* [Proceedings of the Fourth International Aerospace Congress]. Moscow, 2003, 121 p.

11. Ivanov V. V., Maksimov I. A., Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Smirnov V. A. [Model of penetration of plasma formations, formed when the electric propulsion in leaking equipment module of spacecraft]. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii: Aviatsiya i kosmonavtika – 2006*. [Proceedings of International Conference: Aerospace – 2006]. Moscow, 2006, P. 357.

12. Ivanov V. V., Maksimov I. A., Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V. [Mechanisms of exposure to the plasma electric rocket engines to work on-board equipment of spacecraft]. *Vestnik SibGAU*. 2007, No. 3(16), P. 87–91 (In Russ.).

13. Vedenkin N. N., Balashov S. V., Ivanov V. V., Ivanova T. A., Karpenko D. S., Maksimov I. A., Pavlov N. N., Rubinstein L. A., Tverskaya L. V., Trofimchuk D. A., Tulupov V. I. [Solar protons and outer radiation belt during solar extreme events of December 2006: GLONASS and Express data]. *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma "Solnechnye ekstremal'nye yavleniya*" [Proceedings of the International Symposium "Solar Extreme"]. 24–27 September 2007, the Athens, Greece, P. 33.

14. Nadiradze A. B., Shaposhnikov V. V., Khartov V. V., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Smirnov V. A. [Simulation of the formation of the NEA, and surface contamination of spacecraft]. *Model' Kosmosa*, 2007, Vol. 8, 132 p. (In Russ.).

15. Tverskaya L. V., Balashov S. V., Veden'kin N. N. [Increases in solar protons and dynamics of the outer radiation belt electrons during solar extreme events in December 2006]. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2008,Vol. 48, P. 6–8 (In Russ.).

16. *AO "ISS". Analiz dannykh s apparatury AKVS dlya opredeleniya urovney faktorov kosmicheskogo prostranstva*. [The analysis of data from equipment AKVS to determine the levels of space factors]. Moscow, 2014, P. 196–198.

© Тестоедов Н. А., Кочура С. Г.,
Максимов И. А., 2015

УДК 004.94

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 857–862

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ САМОКОНФИГУРИРУЕМОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА В ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Д. В. Федотов*, Е. А. Попов, В. А. Охорзин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: fedotov.dm.v@gmail.com

Развитие компьютерной техники открывает большие возможности для исследователей в области идентификации динамических систем, предлагая новые алгоритмы и возможности их комбинирования в сложные и мощные интеллектуальные информационные технологии. В последнее время особое внимание в области машинного обучения уделяется идентификации динамических объектов, в частности, распознаванию образов в системах компьютерного зрения. Задачи компьютерного зрения возникают в различных областях: промышленность, системы охраны и наблюдения, системы сбора и обработки информации, системы взаимодействия компьютера с человеком и т. д. При решении задач машинного обучения широко и успешно применяются нейронные сети – компьютерные модели, основанные на сети нервных клеток живого организма. Использование классических нейронных сетей создает серьезные сложности при решении задач компьютерного зрения, так как они требуют значительных вычислительных и/или временных ресурсов для обучения, а также теряют важную информацию о топологии исходных данных. Для подобных задач была разработана разновидность нейронных сетей, названная сверточной нейронной сетью, которая входит в подраздел машинного обучения – глубокое обучение (deep learning). Сверточная нейронная сеть используется в качестве центральной технологии в данной работе. Она позволяет строить сложные иерархии признаков и на их основе проводить идентификацию объектов. Использование слоев субдискретизации обеспечивает инвариантность к масштабу изображения, а концепция разделяемых весовых коэффициентов позволяет значительно сократить количество параметров обучения, уменьшая время работы и вычислительную нагрузку. Использование стандартного метода обучения нейронной сети – обратного распространения ошибки – обладает определенными недостатками, которые частично устраняются с помощью использования эволюционного алгоритма оптимизации. Кроме того, качество решения задачи с помощью сверточной нейронной сети существенно зависит от ее структуры, которая тоже может стать объектом настройки с помощью эволюционных алгоритмов. В работе использован самоконфигурируемый генетический алгоритм SelfCGA для настройки структуры и весовых коэффициентов сверточной нейронной сети. Тестирование полученной системы было проведено на задаче идентификации возраста человека по фотографии.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, эволюционные алгоритмы, самоконфигурирование, компьютерное зрение, машинное обучение, идентификация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 857–862

OPTIMISATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK STRUCTURE WITH SELF-CONFIGURING EVOLUTIONARY ALGORITHM IN ONE IDENTIFICATION PROBLEM

D. V. Fedotov*, E. A. Popov, V. A. Okhorzin

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: fedotov.dm.v@gmail.com

Computer technology development has opened great opportunities for researchers in the field of dynamic systems optimization offering new algorithms and ways of their combination into complex and powerful intelligent information technologies. A great interest in the field of machine learning has been given to dynamic objects identification and pattern recognition in computer vision systems in particular recently. Computer vision problems arise in various fields: industry, security and surveillance systems, data acquisition and processing systems, computer-human interaction systems, etc. Neural networks are widely and successfully used for solving machine learning tasks. Neural networks are

computer models based on network of nerve cells of a living organism. Using classical neural network causes major difficulties for solving computer vision tasks as they require significant computational and/or time resources for learning as well as they lose important information about topology of the original data. For this kind of tasks a special type of neural network called convolutional neural network was developed. Convolutional neural network (CNN) is the part of subfield of machine learning called deep learning. CNN is used as the main technology in this paper. It allows to build complex hierarchies of features and perform objects identification based on them. Using of the pooling layers provides invariance to size of the image and concept of parameters sharing can significantly reduce the number of parameters that have to be adjusted and therefore save computational costs and time. Standard training method for neural network (back propagation) has certain weaknesses that can be partially eliminated by using a evolutionary optimization algorithm. The quality of the solution depends on the neural network structure, which can also be adjusted using evolutionary algorithms. In this paper, the self-configuring genetic algorithm SelfCGA is used for CNN's structure and weighting coefficients adjustment. Proposed system is tested on the task of age identification based on the person's photo.

Keywords: convolutional neural network, evolutionary algorithms, self-configuring, computer vision, machine learning, identification.

Введение. Современный мир характеризуется стремительным развитием технологий. Значительное увеличение вычислительной мощности и снижение ее стоимости, произошедшие за последние несколько лет, позволили более широко применять сложные комбинации алгоритмов для решения различных задач. Вместе с повышением мощностей, увеличился и объем данных, открывая огромные возможности исследователям в области анализа данных. Применение алгоритмов машинного обучения, в частности, распознавания образов, прочно вошло в жизнь современного человека в виде голосовых помощников (Siri, Cortana, Google Now), сервисов хранения фотографий, осуществляющих автоматическое определение лица, поиск похожих изображений и т. д. Трудно представить себе компьютерную систему, взаимодействующую с человеком, не использующую алгоритмы машинного обучения. Большой интерес представляет такой раздел машинного обучения, как компьютерное зрение. Результаты исследований в этой области успешно применяются в промышленности (системах управления процессами), системах видеонаблюдения, сбора информации и т. д.

Одним из часто используемых методов моделирования в машинном обучении является нейронная сеть, которая имеет множество разновидностей, разработанных в соответствии с возникающими перед исследователями задачами. Входными данными в классическую нейронную сеть является вектор параметров, который характеризует объект анализа. При решении задач компьютерного зрения (распознавания объектов) входом является изображение, которое не может быть обработано классической нейронной сетью без предварительных преобразований. Одним из вариантов является разложение изображения (таблицы интенсивности пикселей) в вектор, но при этом теряется значительная часть информации, так как нарушается топология исходных данных. Помимо трудностей с предварительной обработкой информации, классической нейронной сети для обработки изображений потребуется также большое число межнейронных связей, что приведет к высоким вычислительным требованиям или затратам времени. Для решения подобных задач подходит сверточная нейронная сеть, которая не имеет описанных выше недостатков.

Сверточные нейронные сети. Идея сверточных нейронных сетей была предложена в 1980 году и получила широкое распространение в конце 1990-х благодаря работам Яна ЛеКуна и Джошуа Бенжио [1–4]. Сверточная нейронная сеть строится наподобие системы нейронов зрительной коры головного мозга и позволяет эффективно решать задачи распознавания образов, наряду с анализом речи и временных рядов [5]. В данной работе будет описана сверточная нейронная сеть для анализа изображений. Сверточные нейронные сети позволяют строить сложные иерархии признаков на основе исходных данных, которые в дальнейшем используются для классификации. Ключевым понятием в теории сверточных нейронных сетей является свертка. Сверткой называется математическая операция, отражающая похожесть одной функции на отраженную и сдвинутую копию другой. Архитектура сверточной нейронной сети представляет собой чередование сверточных и субдискретизирующих слоев. На сверточных слоях выполняется операция свертки входной карты признаков с ядром свертки, которое определяют весовые коэффициенты нейрона. Входной картой признаков для нейронов первого слоя является исходное изображение. На рис. 1 показан результат свертки изображения x с ядром k.

Для удобства представления ядро k было отражено по горизонтали и вертикали, таким образом свертку данных изображений можно рассмотреть в качестве корреляции x и k^*: модифицированное ядро свертки перемещается по изображению x, формируя соответствующие значения выходной карты признаков c. Элементы изображения c рассчитываются по следующей формуле:

$$c_{i,j} = \sum_{p,q} c_{i+p,j+q} \cdot c_{r-p,r-q}\ ,\ p,q = 0,\ 1,\ ...,\ r-1,$$

где r – размер ядра свертки. Карта признаков, полученная в результате свертки, проходит через активационную функцию, результат которой становится выходом нейрона сверточного слоя и, соответственно, входом для нейрона субдискретизирующего слоя.

Слои субдискретизации, следующие после сверточных, уменьшают размерность карты признаков и обеспечивают инвариантность к масштабу. В отличие

от сверточных слоев, они имеют один регулируемый параметр – фактор субдискретизации, который определяет, во сколько раз будет уменьшено изображение. Существуют различные способы уменьшения размера карты признаков с помощью слоев субдискретизации. Входная карта признаков разбивается на подобласти в соответствии с фактором субдискретизации. Например, если фактор равен 2, то карта признаков разбивается на области размером 2 на 2. После этого в каждой области по определенному принципу выбирается или рассчитывается значение, которое становится элементом новой, выходной карты признаков. Одним из примеров правила расчета значений может быть усреднение значений внутри области (рис. 2).

Идея сверточной нейронной сети предполагает использование разделяемых весов, т. е. применение одних и тех же весовых коэффициентов для различных межнейронных связей. Данный подход позволяет значительно сократить количество настраиваемых параметров и ускорить обучение нейронной сети [6]. После прохождения нескольких слоев карта признаков раскладывается в вектор, который используется в качестве входа для классификатора. Общую архитектуру сверточной нейронной сети с двумя сверточными слоями, содержащими 5 и 10 нейронов соответственно, можно изобразить в виде схемы, представленной на рис. 3. Размер входного изображения – 28×28 пикселей, размер ядра свертки – 5×5, количество классов – 10, фактор субдискретизации – 2.

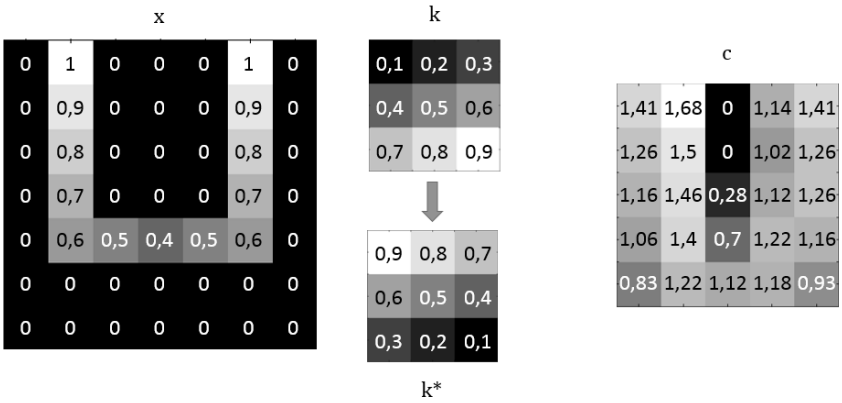


Рис. 1. Пример свертки изображений

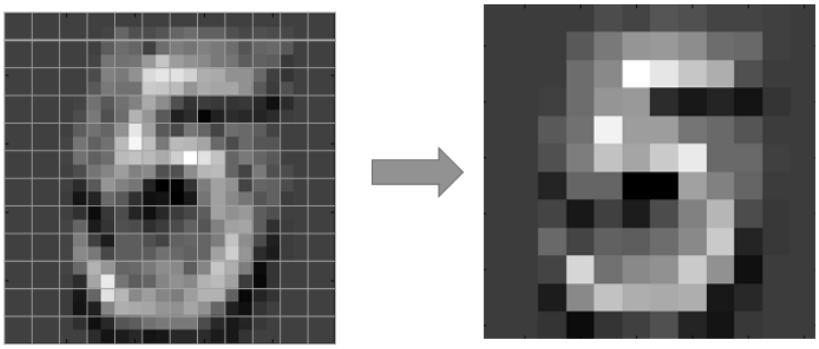


Рис. 2. Пример работы слоя субдискретизации

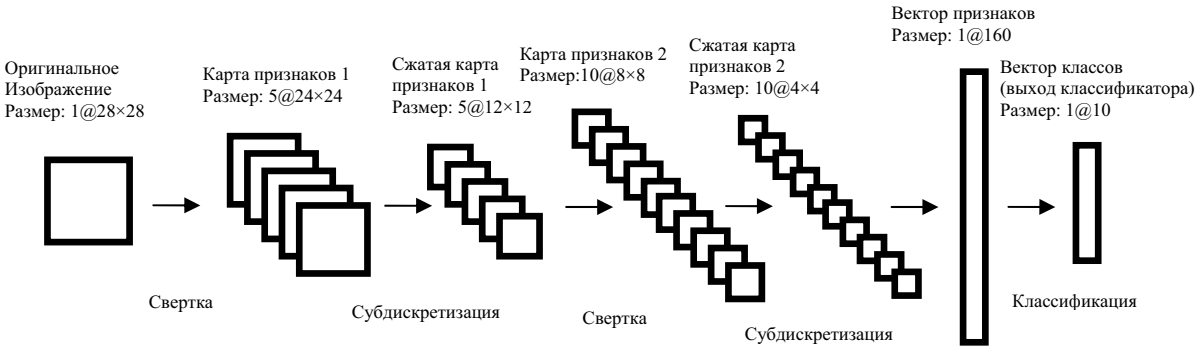


Рис. 3. Архитектура сверточной нейронной сети

Поскольку при использовании сверточной нейронной сети значительно сокращается количество настраиваемых весовых коэффициентов, возможно более гибкое и менее вычислительно затратное применение алгоритмов для обучения нейронной сети. Также на эффективность работы нейронной сети влияет ее структура, которая должна подбираться автоматически под каждую поставленную задачу. Для решения этих задач в данной работе используется генетический алгоритм.

Самоконфигурируемый генетический алгоритм. Идея генетического алгоритма, как и нейронных сетей, заимствована у природы. В основе генетического алгоритма лежит концепция эволюции: отбор наиболее приспособленных индивидов, скрещивание и мутация. Генетические алгоритмы широко применяются в сложных задачах отыскания глобального оптимума, в частности, при отсутствии четкой математической модели.

Генетический алгоритм имеет параметры, определяющие характер его работы, которые значительно влияют на эффективность решения поставленной задачи. Данные параметры не только отличаются для каждой решаемой задачи, но также требуют экспертных знаний от пользователя. При использовании только стандартных операторов получается более 100 их комбинаций, что делает задачу выбора определенного набора достаточно сложной [7–9].

Поскольку оптимальные значения параметров алгоритма не известны заранее, имеется необходимость в организации процедуры автоматического поиска таких значений для повышения качества решения задачи. Данная процедура реализована в самоконфигурируемом генетическом алгоритме SelfCGA [10]. Вероятности применения определенных типов операторов в SelfCGA рассчитываются исходя из их успешности на предыдущих поколениях. При работе алгоритма не требуется хранение информации о предыдущих поколениях (кроме последнего), в связи с этим не накладываются требования к большим ресурсам для хранения данных [11]. Помимо этого, вероятности применения операторов не включены в хромосому и не являются объектом эволюции, тем самым исключая увеличение пространства оптимизации. Вычислительные ресурсы, требуемые для работы алгоритма, не увеличиваются с ростом числа поколений.

Описанные выше преимущества алгоритма SelfCGA позволяют успешно использовать его в сочетании с другими интеллектуальными информационными технологиями, например, с нейронной сетью [12–17].

Блок схема самоконфигурируемого алгоритма SelfCGA представлена на рис. 4.

Настройка нейронной сети с помощью генетического алгоритма. Как отмечалось ранее, качество решения задачи с помощью нейронной сети значительно зависит от выбранной структуры и алгоритма обучения. Традиционно нейронные сети обучаются с помощью метода обратного распространения ошибки [18], который применим и в случае сверточной нейронной сети с некоторыми поправками, вызванными спецификой работы нейронов слоев свертки и субдискретизации. Однако алгоритм обратного распространения ошибки является градиентным методом и может приводить к попаданию в локальный оптимум, особенно при сложной поверхности функции ошибки. Во избежание такой ситуации следует применить генетический алгоритм для определения начальных значений весовых коэффициентов нейронной сети, после чего использовать метод обратного распространения ошибки для более тонкой их настройки.

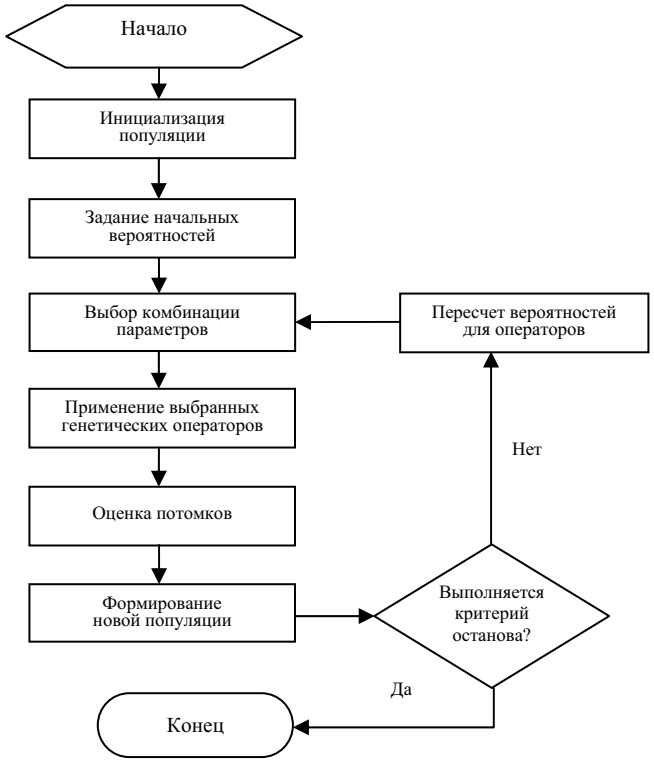


Рис. 4. Блок-схема самоконфигурируемого генетического алгоритма SelfCGA

Выбор структуры сверточной нейронной сети подразумевает настройку таких параметров, как количество пар слоев свертки и субдискретизации, определение количества нейронов в каждом слое, размер ядра свертки и значение фактора субдискретизации.

Решение задачи определения возраста человека по фотографии. Проверка эффективности предлагаемого подхода будет произведена на задаче определения возраста человека по его фотографии. В используемой базе данных содержится 646 примеров. Необходимо определить возрастную группу человека на фотографии из следующих:

1) 18–23 года;
2) 23–27 лет;
3) 25–36 лет;
4) 32–49 лет;
5) 46–60 лет;
6) 58–70 лет;
7) >70 лет.

Для решения данной задачи для нейронной сети была выбрана следующая структура по умолчанию: 3 скрытых слоя, 7 нейронов на каждом слое, размер ядра свертки – 5, фактор субдискретизации – 2, количество эпох обучения – 300.

Для выбора начальных весов использовался алгоритм SelfCGA со следующими параметрами: число индивидов – 50, число поколений – 100. После предварительной настройки весов обучение нейронной сети происходило с большей скоростью, что повысило эффективность системы.

Подбор структуры нейронной сети с помощью генетического алгоритма является вычислительно затратным процессом, в связи с этим были использованы следующие параметры: число индивидов – 8, число поколений – 10. При подборе структуры сверточной нейронной сети наблюдались следующие тенденции:

1. Большей эффективностью при данных параметрах обучения обладают структуры со средним числом нейронов. Большое число нейронов в слое приводит к нехватке ресурсов для обучения. Соответственно, для обучения таких сетей необходимо использовать большее количество эпох, что существенно повышает вычислительную сложность.

2. Большей эффективностью обладают структуры, в которых размер ядра свертки уменьшается с увеличением номера слоя. Например, 3 слоя со следующими размерами ядер свертки: 7, 5, 3.

3. Положительно на эффективности сказывается увеличение количества нейронов в слое с увеличением его номера. Например, 3 слоя с 5, 7, 10 нейронами соответственно.

Результаты тестирования сверточной нейронной сети для решения задачи определения возраста по фотографии представлены в таблице. Сверточная нейронная сеть обозначена аббревиатурой CNN.

На основании данных, представленных в таблице, можно сделать вывод, что комбинирование сверточной нейронной сети с самоконфигурируемым генетическим алгоритмом для настройки структуры и начальных весовых коэффициентов позволяет повысить эффективность работы нейронной сети при решении задачи идентификации.

Результаты тестирования сверточной нейронной сети

	CNN	CNN + SelfCGA (веса)	CNN + SelfCGA (веса и структура)
Точность классификации	57,61 % [54,11–58,22]	61,97 % [59,56–64,38]	65,01 % [62,33–66,44]

Заключение. Использование сверточных нейронных сетей в качестве моделей при решении задач идентификации, в частности, распознавания образов в системах компьютерного зрения, позволяет строить гибкие и эффективные модели. Комбинирование сверточной нейронной сети с самоконфигурируемым генетическим алгоритмом для настройки весовых коэффициентов и подбора структуры положительно сказывается на качестве решения задач.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта № 72/14 «Развитие методов идентификации и управления динамическими системами на основе эволюционных стратегий» тематического плана ЕЗН СибГАУ.

Acknowledgments. This research was conducted as the part of the project № 72/14 “Development of the methods for identification and control of dynamic systems based on evolutionary strategies” from the thematic plan of the unified order for SibSAU.

Библиографические ссылки

1. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition / Y. LeCun [et al.] // Proceedings of the IEEE. 1998. No. 86(11). P. 2278–2324.

2. Bottou L., LeCun Y., Bengio Y. Global training of document processing systems using graph transformer networks // Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition. Puerto-Rico, 1997. P. 490–494.

3. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y. Reading checks with graph transformer networks // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1997. Vol. 1. P. 151–154.

4. Comparison of learning algorithms for handwritten digit recognition / LeCun Y. [et al.] // International Conference on Artificial Neural Networks. 1995. P. 53–60.

5. LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series // The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. MIT Press, 1995. P. 255–258.

6. Bengio Y., Goodfellow I. J., Courville A. Deep Learning Book in preparation for MIT Press. 2015. P. 173–190

7. Wright A. Genetic algorithms for real parameter optimization // Foundations of Genetic Algorithms. 1991. P. 205–218.

8. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computing. Berlin : Springer. 2003. 300 p.

9. Сергиенко А. Б. Генетический алгоритм. Стандарт. Версия 3.12. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. 45 p.

10. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2012. 7331 LNCS (PART 1). P. 414–421.

11. Gomez J. Self Adaptation of Operator Rates Evolutionary Algorithms // Genetic and Evolutionary Computation, GECCO, Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 3102. P. 1162–1173.

12. Semenkina M., Semenkin E. Hybrid Self-configuring Evolutionary Algorithm for Automated Design of Fuzzy Classifier // Advances in Swarm Intelligence. 2014. Part 1, LNCS 8794. P. 310–317.

13. Burakov S. V., Semenkin E. S. Solving variational and Cauchy problems with self-configuring genetic programming algorithms // International Journal of Innovative Computing and Applications. 2013. Vol. 5, Iss. 3. P. 152–162.

14. Semenkin E., Semenkina M. Classifier Ensembles Integration with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm // Adaptive and Natural Computing Algorithms: Lecture Notes in Computer Science. 2013. Vol. 7824. P. 60–69.

15. Федотов Д. В., Семенкин Е. С. О прогнозировании экономических показателей с помощью нейроэволюционных моделей // Вестник СибГАУ. 2014. № 5 (57). P. 299–304.

16. Fedotov D.V. On financial time series prediction using neural network models and evolutionary algorithms // Materials of the Third International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA-2014). 2014. P. 1–3.

17. Федотов Д. В. О применении сверточных нейронных сетей для решения задач распознавания образов // Проспект Свободный – 2015 : материалы науч. конф. / Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2015. P. 56–57.

18. Werbos P. J. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences / Harvard University. Cambridge, MA, 1974. 906 p.

References

1. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE,* 1998, No. 86(11), P. 2278–2324.

2. Bottou L., LeCun Y., Bengio Y. Global training of document processing systems using graph transformer networks. *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition*, Puerto-Rico, 1997, P. 490–494.

3. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y. Reading checks with graph transformer networks. *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing,* 1997, Vol. 1, P. 151–154.

4. LeCun Y., Jackel L. D., Bottou L et al. Comparison of learning algorithms for handwritten digit recognition. *International Conference on Artificial Neural Networks*, 1995, P. 53–60.

5. LeCun Y., Bengio Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time-Series. *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, MIT Press, 1995, P. 255–258.

6. Bengio Y., Goodfellow I. J., Courville A. Deep Learning Book in preparation. MIT Press, 2015, P. 173–190.

7. Wright A. Genetic algorithms for real parameter optimization. *Foundations of Genetic Algorithms*, 1991, P. 205–218.

8. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to evolutionary computing. Springer, Berlin, Germany 2003, 300 p.

9. Sergienko A. B. *Geneticheskiy algoritm. Standart. Versiya* 3.12 [Genetic algorithm. Standard. Version 3.12], Krasnoyarsk, SibGAU Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics),* 2012, 7331 LNCS (Part 1), P. 414–421.

10. Semenkin E., Semenkina M. Self-configuring genetic algorithm with modified uniform crossover operator. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2012. 7331 LNCS (PART 1). P. 414–421.

11. Gomez J. Self Adaptation of Operator Rates Evolutionary Algorithms. *Genetic and Evolutionary Computation, GECCO 2004, Lecture Notes in Computer Science,* 2004, Vol. 3102, P. 1162–1173.

12. Semenkina M., Semenkin E. Hybrid Self-configuring Evolutionary Algorithm for Automated Design of Fuzzy Classifier. *Advances in Swarm Intelligence ICSI*, 2014, Part 1, LNCS 8794, P. 310–317.

13. Burakov S. V., Semenkin E. S. Solving variational and Cauchy problems with self-configuring genetic programming algorithms. *International Journal of Innovative Computing and Applications*, 2013, Vol. 5, Iss. 3, P. 152–162.

14. Semenkin E., Semenkina M. Classifier Ensembles Integration with Self-Configuring Genetic Programming Algorithm. *Adaptive and Natural Computing Algorithms. Lecture Notes in Computer Science,* 2013, Vol. 7824, P. 60–69.

15. Fedotov D. V., Semenkin E. S. [On forecasting economic indexes by means of neuroevolutionary models]. *Vestnik SibGAU,* 2014, No. 5 (57), P. 299–304 (In Russ.).

16. Fedotov D. V. On financial time series prediction using neural network models and evolutionary algorithms. *Materials of the Third International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA-2014)*, 2014, P. 1–3.

17. Fedotov D. V. [On using convolutional neural networks for pattern recognition tasks]. *Prospekt Svobodnyy-2015 : materialy nauch. konf.* [Svobodnyy avenue 2015: Materials of scientific conference], 2015, P. 56–57 (In Russ.).

18. Werbos P. J. *Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences.* Harvard University, Cambridge, MA, 1974, 906 p.

© Федотов Д. В., Попов Е. А., Охорзин В. А., 2015

Раздел
Part
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

AVIATION AND SPACECRAFT ENGINEERING

УДК 621.396.67:629.78.01

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 864–867

МОДЕЛЬ ВЛАГОПОГЛОЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АНТЕНН КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Башков[1], Р. А. Ермолаев[1, 2], А. Б. Кузнецов[1], А. Е. Михеев[2*], А. В. Гирн[2]

[1]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: michla@mail.ru

Рассмотрены процессы, протекающие при нахождении полиимидных пленок и углепластика в воздушной среде с различной влажностью. В космических аппаратах (КА) часто применяются различные полимерные материалы, в том числе полиимидные пленки и углепластики. Рефлекторы антенн из композиционных материалов для обеспечения требуемых радиотехнических характеристик покрывают тонким отражающим слоем металла, обычно алюминия. Для исключения возможной коррозии напыленного слоя на данных материалах необходимо знать количество влаги, содержащейся в объеме материала. При влагопоглощении полиимидными пленками и углепластиками происходит диффузия молекул воды, содержащихся в атмосфере, в объем материала. Для определения количества и кинетики сорбции влаги, содержащейся в окружающем воздухе, использована математическая модель, описанная Фиком. На основе уравнения Фика и условий, возникающих при построении модели для тонких полимерных материалов, получено уравнение для расчета динамики влагопоглощения полимерными материалами.

По полученной модели влагопоглощения можно определить коэффициенты диффузии материалов путем термогравиметрического анализа и сопоставления полученных результатов с данной моделью.

Получение и отбор материалов с пониженным значением влагопоглощения – это перспективное направление в материаловедении применительно к ракетно-космической сфере. Материалы с малым количеством поглощенной влаги позволяют производить КА с более длительным сроком активного существования и необходимы для перспективных аппаратов, в особенности с криогенным оборудованием.

Ключевые слова: полиимидные пленки, углепластик, диффузия, сорбция.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 864–867

MODEL OF MOISTURE ABSORPTION MATERIALS USED IN THE MANUFACTURE OF SPACECRAFT ANTENNAS

I. V. Bashkov[1], R. A. Ermolaev[1, 2], A. B. Kuznetsov[1], A. E. Miheev[2*], A. V. Girn[2]

[1]JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: michla@mail.ru

In this case study the processes occurring in finding the polyimide films and carbon plastic in the air with different humidity have been analyzed. Various polymeric materials including polyimide film and carbon fiber are used in spacecraft (SC) manufacture.

For achievement of desired radio characteristics for composite reflector antennas are coated with a thin reflective metal layer, usually aluminum. It is necessary to know the volume of moisture contained in the bulk material, for elimination of corrosion risk for the sprayed layer.

In case of moisture-absorption of the polyimide film and CFRP, the diffusion of water molecules contained in the atmosphere into the material occurs.

Fick’s mathematical model is used to determine the amount and sorption kinetics of moisture contained in the ambient air. On the basis of the Fick's equation and conditions arising in the construction of models for thin polymeric materials the equation for calculating the dynamics of moisture absorption polymeric materials was obtained.

According to the resulting model of moisture absorption, the diffusion coefficients of materials by thermo gravimetric analysis and comparison of the results obtained, with this model can be determined.

The production and selection of material with low moisture absorption value is a trans-promising direction in materials applied to the rocket and space industry. The materials with a small amount of moisture absorbed by the SC allow a longer active life (CAC) and the need for future up-formulations, in particular – with cryogenic equipment.

Keywords: Polyimide film, carbon fiber, diffusion, sorption.

Введение. В состав антенн космического аппарата входят высокоточные размеростабильные рефлекторы из композиционных материалов, к которым предъявляются высокие требования по точностям в различных температурных условиях эксплуатации. Наибольший вклад в отклонения рабочей поверхности от теоретической формы вносят термоупругие деформации, обусловленные влиянием температурного перепада, различием коэффициентов линейного теплового расширения материалов рефлектора (обшивок, сотового заполнителя, клеев), схем армирования полимерных композиционных материалов [1]. Рефлекторы антенн из композиционных материалов, работающие в высокочастотных диапазонах (*Ka*, *Ku*, *Q* и выше), для обеспечения требуемых радиотехнических характеристик покрываются тонким (около 1 мкм) отражающим слоем металла, как правило, алюминия.

В условиях космического пространства рефлекторы антенн подвергаются воздействию различных факторов, в том числе высоких и сверхнизких температур и сверхвысокого вакуума. Для термостабилизации рефлекторов применяется экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), представляющая собой пакет экранов, разделенных между собой легкой теплоизолирующей прокладкой (например, полиэфирной или арамидной сеткой). Экраны ЭВТИ изготавливают из полимерных пленок путем напыления на них теплоотражающих покрытий из металлов. Для умеренных температур (до 150–300 °С) обычно применяются пленочные экраны из полиэтилентерефталатной или полиимидной подложки с односторонним или двусторонним алюминиевым покрытием [2].

При хранении изготовленной пленки или рефлектора из углепластика с напылением может возникать коррозия напыленного слоя, в том числе и из-за влаги, содержащейся в объеме исходной пленки (углепластика), или из-за влаги, приобретенной объемом материала уже после напыления. Также наличие влаги, адсорбированной материалом, может приводить к значительному вкладу в состав собственной внешней атмосферы КА молекул воды при газовыделении материалами во время нахождения в условиях космоса, что ухудшает термооптические свойства элементов криогенного оборудования и его теплоизоляции [3]. Это увеличивает затраты энергии на поддержание температуры оборудования и снижает эффективность целевой аппаратуры (например, рефлекторов зеркальных антенн, оптической системы телескопа).

При влагопоглощении полиимидными пленками и углепластиками происходит диффузия молекул воды в объем материала [4–8]. Для уменьшения деградации напыленного слоя и сохранения оптических коэффициентов разработанных покрытий необходимо выбирать пленки и углепластики с наименьшим значением влагопоглощения и оптимизировать технологические процессы производства и транспортировки для минимизации воздействия атмосферной влаги.

Таким образом, необходимо знать абсолютное значение и кинетику влагопоглощения для определения их временных и количественных параметров.

Математическое описание процесса диффузии. Первое количественное описание процессов диффузии было дано немецким физиологом А. Фиком в 1855 году.

Уравнение Фика [9; 10], описывающее нестационарный процесс диффузии, показывает изменение концентрации вещества в различных точках пространства изотропной среды как функцию времени. Общий вид уравнения Фика

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{d^2c}{dx^2}, \tag{1}$$

где D – коэффициент диффузии; c – концентрация вещества.

Решая данное уравнение для случая сорбции пленок толщиной L, найдем количество вещества, проникшего в тело к моменту времени, соответственно равное [11; 12]:

$$Q = c_0 l\left\{\cdot 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{k=0}^{\infty}\frac{1}{(2k+1)^2}\exp\left[-\frac{(2k+1)^2}{l^2}\pi^2 Dt\right]\cdot\right\}, \tag{2}$$

где Q – количество вещества; l – толщина пленки; t – время проникновения вещества.

Переходя к более привычным обозначениям массы, получим уравнение (3), по которому можно найти массу вещества [13–15], сорбированного образцом к моменту времени t:

$$M_t = \int_0^l c(x,t)dx = \\ = M_\infty\left[1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp\left\{-\frac{(2n+1)^2\pi^2}{l^2}Dt\right\}\right], \tag{3}$$

где M_∞ – равновесная масса сорбированного вещества; M_t – масса сорбированного вещества в момент времени t.

Для удобства расчета разложим сумму до 3-го члена и запишем новое уравнение:

$$M_t = M_\infty\left(1 - \frac{8}{\pi^2}\left\{\exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{l^2}\right] + \right.\right. \\ \left.\left. + \frac{1}{9}\exp\left[-\frac{9\pi^2 Dt}{l^2}\right] + \frac{1}{25}\exp\left[-\frac{25\pi^2 Dt}{l^2}\right]\right\}\right). \tag{4}$$

Уравнение (4) позволяет построить график зависимости приобретенной массы от времени сорбции материалом.

При расчетах графиков функций влагопоглощения необходимо учитывать условия, при которых реально

будет происходить сорбция влаги полиимидными пленками и другими материалами. Так как толщина пленки много меньше ее длины и ширины, то мы не учитываем вклад боковых поверхностей пленки в общее значение влагопоглощения. Также при определении значений сорбции необходимо учитывать, что расчет производится для диффузии только с одной стороны пленки. При расчетах, в которых образец находится полностью в среде абсорбата, необходимо производить расчеты с учетом двусторонней абсорбции.

Полученное уравнение позволяет рассчитать кинетику сорбции для тонких полимерных материалов (без учета сорбции через боковые стенки), таких как полиимидные пленки и углепластики.

В качестве примера применения используемой модели влагопоглощения показаны графики сравнения влагопоглощения для полиимидной пленки и углепластика, полученные в ходе натурных испытаний, и расчетные графики с применением данной модели (рис. 1, 2).

Как видно из представленных рисунков, модель Фика описывает с высокой точностью динамику влагопоглощения углепластика и полиимидных пленок.

Рассчитанные кривые сорбции позволяют определять условия хранения и транспортировки, оптимизировать этапы производства материалов для уменьшения количества приобретаемой материалом влаги.

Также с помощью данной математической модели возможно определение коэффициента диффузии материала. Для определения коэффициента диффузии материала необходимо проведение термогравиметрического анализа материала и последующая математическая обработка и сопоставление полученных кривых с математической моделью.

Заключение. В работе показана возможность использования модели Фика для определения коэффициентов диффузии и параметров влагопоглощения как для полиимидных пленок, так и для углепластиков.

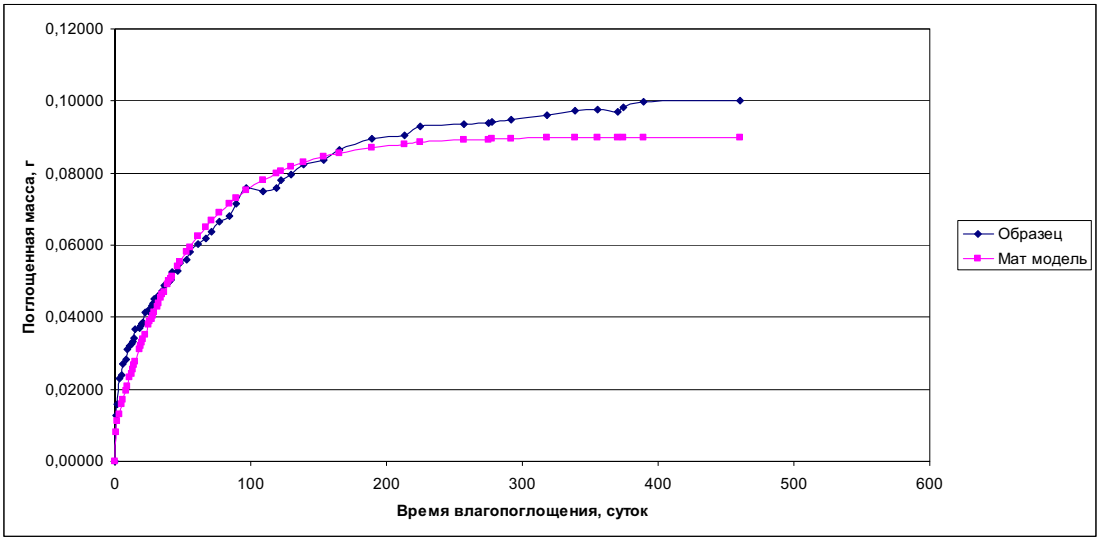


Рис. 1. Зависимости массы поглощенной влаги от времени поглощения углепластиком, полученные в натурных испытаниях и с помощью модели Фика

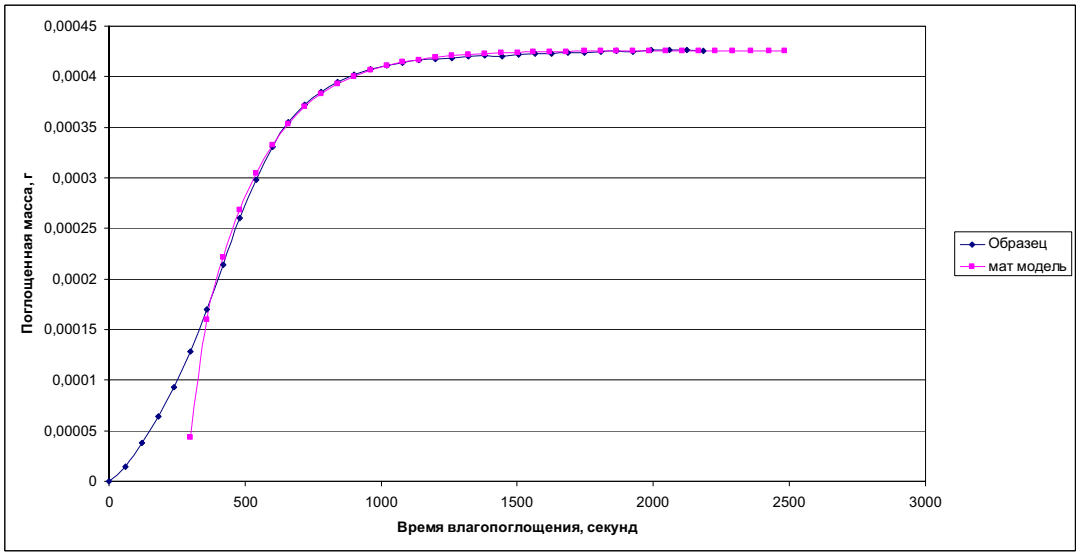


Рис. 2. Зависимости массы поглощенной влаги от времени поглощения полиимидной пленкой, полученные в натурных испытаниях и с помощью модели Фика

Таким образом, предложена методика расчета количества влаги, содержащейся в материалах, применяемых в антеннах КА, количество которой зависит от природы материала, времени нахождения в атмосфере паров воды и геометрических размеров материала.

Предложен простой метод определения коэффициента диффузии полимерных материалов с помощью описанной математической модели и проведения термогравиметрического анализа материала.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/к.

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, the state contract № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/k.

Библиографические ссылки

1. Тестоедов Н. А., Двирный Г. В., Пермяков М. Ю. Определение величины температурной деформации размеростабильных рефлекторов // Вестник СибГАУ. 2011. № 2 (35). С. 67–70.

2. Мануйлов К. К. Исследование теплофизических и механических характеристик композитных материалов экранно-вакуумной теплоизоляции // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2015. № 53. 16 с.

3. Влияние толщины криоконденсата на радиационные характеристики экрана теплоизоляции / Р. С. Михальченко [и др.]. ФТИНТ, 1988. 14 с.

4. Tsenoglou C. J., Pavlidou S. and Papaspyrides C. D. Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber-polymer composites // Composites Science and Technology. 2006. Vol. 66, No. 15. P. 2855–2864.

5. Моделирование влагопереноса в слоистых пластиках и стеклопластиках / О. В. Старцев [и др.] // Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5, № 2. С. 109–114.

6. Мелёхина М. И., Кавун Н. С., Ракитина В. П. Эпоксидные стеклопластики с улучшенной влаго- и водостойкостью // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 29–31.

7. Sala G. Composite degradation due to fluid absorption // Composites. Part B. 2000. Vol. 31, No. 5. P. 357–373.

8. Shen C. H., Springer G. S. Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials // Journal of Composite Materials. 1976. Vol. 10. P. 2–20.

9. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikawa. Effects of water absorption and temperature on compression after impact (cal) strength of CFRP laminates // 16th Intern. Conf. on composite materials. 2007. 7 p.

10. Hyojin Kim, Kenichi Takemura. Influence of water absorption on creep behaviour of carbon fiber/ epoxy laminates // Procedia Engineering, 2011 .Vol. 10. P. 2731–2736.

11. Грот С., Маузер П. Неравновесная термодинамика. М. : Мир, 1967. 456 с.

12. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов. М. : Химия, 1974. 269 с.

13. Манин В. А., Громов А. Н., Ковалкин М. А. Надежность и долговечность полимерных материалов и изделий из них. М., 1953. С. 85.

14. Norton F. J. Gas permeation through lexan polycarbonate resin // Journal of Applied Polymer Science. 1963. Vol. 7, No. 5. P. 1649–1659.

15. Eschbach H., Jaeckel R., Muller D. Z. Permeability of polymeric materials // Naturforsch. 1963. 18a. 434 p.

References

1. Testoedov N. A., Dvirnyy G. V., Permyakov M. Yu. [Determination of the thermal deformation of dimensionally reflectors]. *Vestnik SibGAU*. 2011, No. 2(35), P. 67–70 (In Russ.).

2. Manuylov K. K. [Study of thermal and mechanical characteristics of the composite screen-vacuum heat insulation]. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha*, 2015, No. 53, 16 p. (In Russ.).

3. Mikhal'chenko R. S., Grigorenko B. V., Getmanets V. F., Kurskaya T. A. *Vliyanie tolshchiny kriokondensata na radiatsionnye kharakteristiki ekrana teplo-izolyatsii* [Influence of thick-ness pyrocondensate on the radiation characteristics of the screen insulation]. Khar'kov, FTINT, 1988, 14 p.

4. Tsenoglou C. J., Pavlidou S., Papaspyrides C. D. Evaluation of interfacial relaxation due to water absorption in fiber–polymer composites. *Composites Science and Technology*, 2006, Vol. 66, No. 15, P. 2855–2864.

5. Startsev O. V., Kuznetsov A. A., Krotov A. S., Anikhovskaya L. I., Senatorova O. G. [Modelling of moisture in laminated plastic and fiberglass]. *Fizicheskaya mezzomekhanika*. 2002, Vol. 5, No. 2, P. 109–114 (In Russ.).

6. Melekhina M. I., Kavun N. S., Rakitina V. P. [Fiberglass epoxy with improved moisture resistance and water resistance]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2013, No. 2, P. 29–31 (In Russ.).

7. Sala G. Composite degradation due to fluid absorption. *Composites Part B*. 2000, Vol. 31, No. 5, P. 357–373.

8. Shen C. H., Springer G. S. Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials. *Journal of Composite Materials*, 1976, Vol. 10, P. 2–20.

9. Yuichiro Aoki, Ken Yamada, Takashi Ishikawa. Effects of water absorption and temperature on compression after impact (cal) strength of CFRP laminates. *16th international conference on composite materials*, 2007, 7 p.

10. Hyojin Kim, Kenichi Takemura. Influence of water absorption on creep behaviour of carbon fiber/epoxy laminates. *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 10, P. 2731–2736.

11. Grot S., Mauzer P. *Neravnovesnaya termodinamika* [Non-equilibrium thermodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1967, 456 p.

12. Reytlinger S. A. *Pronitsaemost' polimernykh materialov* [The permeability of the polymeric material]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 269 p.

13. Manin V. A., Gromov A. N., Kovalkin M. A. *Nadezhnost' i dolgovechnost' polimernykh materialov i izdeliy iz nikh* [Reliability and durability of polymer materials and products from them]. Moscow, 1953, 85 p.

14. Norton F. J. Gas permeation through lexan polycarbonate resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 1963, Vol. 7, No. 5, P. 1649–1659.

15. Eschbach H., Jaeckel R., Muller D. Z. Permeability of polymeric materials. *Naturforsch*, 1963, 18a, 434 p.

© Башков И. В., Ермолаев Р. А., Кузнецов А. Б., Михеев А. Е., Гирн А. В., 2015

UDC 621.396.673

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 868–874

ANTENNA MODULES OF GNSS USER EQUIPMENT: INNOVATIVE APPROACHES

S. N. Boyko, A. V. Isaev, S. V. Kosyakin, A. S. Kukharenko, Y. S. Yaskin

Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering
53, Aviamotornaya Str., Moscow, 111250, Russian Federation
E-mail: npk6@mail.ru

An original engineering conception of the navigation antenna module design, involving the idea that a dielectric substrate of the antenna element is made of a ceramic in the form of a turned cup provided with the patch on its top and metalized cavity, in which all active elements are placed, is suggested. The cup-shaped antenna element has additional advantages against the patch antenna of a traditional form: it has a wider matching band, higher radiation efficiency, a wider radiation pattern, and a wider (up to 1.5 times) meridian angle range, with circular field polarization. Metamaterial, used in the antenna element of an all-ceramic type antenna module, allows obtaining a circular field polarization even at low elevation angles, which only a quadrifilar antenna has. To work with all operating GNSS systems (in the extended bandwidth), an antenna element, which has two planar axial elements placed on the common substrate, is proposed. The antenna element can also be designed to work in 2 bands, for example, in L1 and L2 GLONASS/GPS or in L1 and L2 GPS/GALILEO. A multi frequency stacked antenna design method with opposite feeding of the antenna elements, which provides the antenna element isolation of more than 25 dB and identical radiation patterns is suggested. It is proposed to use for multipath mitigating a special type of the EBG-metamaterial and, as well, a special method of multipath mitigating ground plane mounting, which doesn't narrow antenna element radiation pattern and doesn't spoil phase center stability.

Keywords: antenna modules, GNSS antennas, patch antennas, active antennas.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 868–874

АНТЕННЫЕ МОДУЛИ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГНСС: ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ

С. Н. Бойко, А. В. Исаев, С. В. Косякин, А. С. Кухаренко, Ю. С. Яскин

Филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» –
Научно-исследовательский институт космического приборостроения
Российская Федерация, 111250, г. Москва, ул. Авиамотрная, 53
E-mail: npk6@mail.ru

Представлена оригинальная концепция проектирования навигационных антенных модулей, основанная на том, что подложка антенного элемента выполняется из керамики в форме перевернутой чаши, с топологией антенны на своей внешней стороне и металлизированной внутренней полостью, в которой размещаются все активные элементы. Антенный элемент в форме перевернутой чаши имеет также дополнительные преимущества пред антеннами традиционного типа: более широкую полосу по согласованию, большую эффективность излучения, расширенную диаграмму направленности и более широкий (до полутора раз) диапазон углов диаграммы направленности, в котором сохраняется круговая поляризация. Применение метаматериала в конструкции антенного элемента цельнокерамического антенного модуля позволяет получить круговую поляризацию даже на низких углах места, что является свойством только лишь квадрифилярных антенн. Для обеспечения работы со всеми спутниковыми навигационными системами (в расширенной полосе частот) предложена конструкция антенны с двумя аксиально-симметричными элементами, расположенными на общей подложке. Конструкция этого антенного элемента также может быть адаптирована для работы в двух диапазонах, например, в L1 и L2 GLONASS/GPS или в L1 и L2 GPS/GALILEO. Представлен метод проектирования многочастотных антенн этажерочного типа с кроссзапиткой антенных элементов, обеспечивающий развязку между антенными элементами более 25 дБ и идентичность их диаграмм направленности. Для отсечки многолучевости предложено использовать специальную полосно-заграждающую структуру метаматериала. Также представлен специальный метод применения такой структуры, который позволяет избежать обужения диаграммы направленности и не портит стабильность фазового центра антенного элемента.

Ключевые слова: антенные модули, антенны GNSS, печатные антенны, активные антенны.

Introduction. In our days in the world practice standard antenna module design approaches and methods are formed. In the paper our methods and solutions, which differ from the conventional ones, are presented.

During the navigation antennas design a trend of integrating of antenna element, filters, low noise amplifier (LNA) and also a receiver chipset into a union device, named active navigation antenna or navigation antenna module (NAM) is seen.

Usually a microstrip (or patch) antenna (MSA) acts as an antenna element of a NAM, as a mostly compact [1–3].

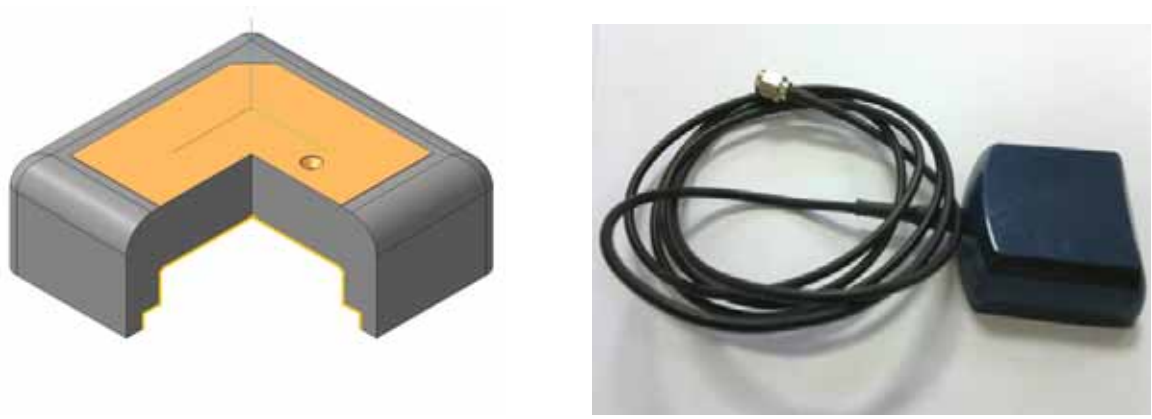
Navigation antenna modules design innovative approaches. An original conception of the NAM was suggested by our company, according which a dielectric substrate of the antenna element is made of a ceramic in the form of turned cup provided with the patch on its top and metalized inner hollow, in which all active elements are placed [4; 5]. This technology of NAM production was named “uncased” or “full-ceramic”.

A cup-shape antenna element and navigation natenna module, made basing on it and using uncased technology, are presented on fig. 1.

As a result of this way of NAM design, their strength was significantly increased and size was optimized, as well the production cost was reduced for a module because of its high manufacturability. Also, turned-cup shape antenna has additional advantages comparing with traditional patch antenna. It has 1.5–2 times wider working band, its radiation efficiency is about 6 % higher, wider radiation pattern and wider (up to 1.5 times) meridian angle range in which circle field polarization persists (fig. 2). These advantages give an opportunity of the total NAM miniaturization.

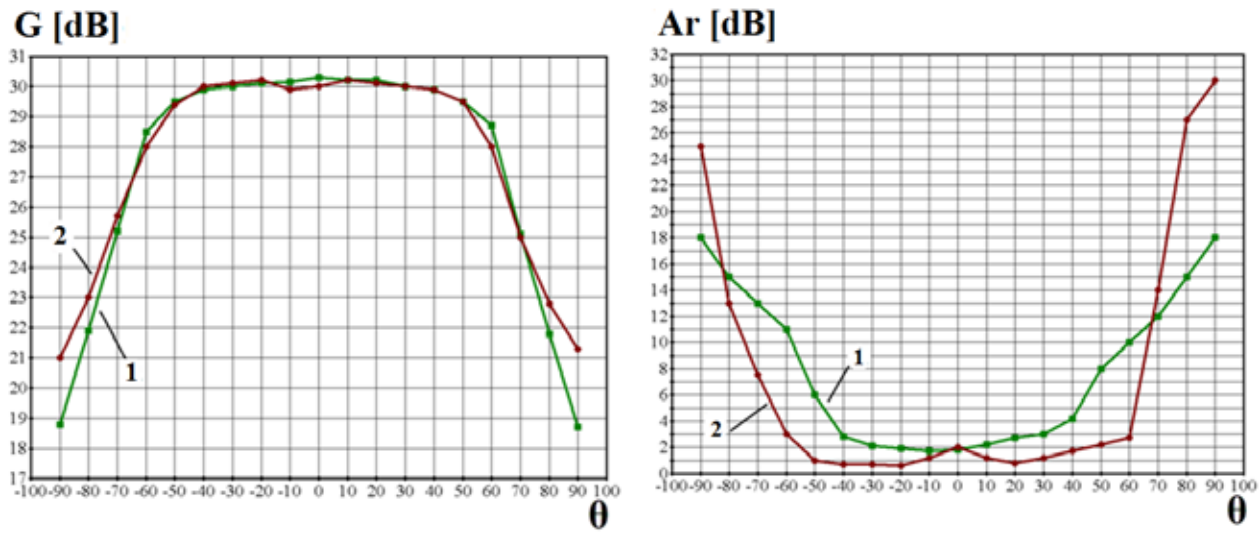
Besides, parameters of cup-shaped antenna elements depend much less on the additional shield size, on which they can be placed [2; 5]. Consequently, NAM, made using uncased technology, can be used even without additional shield.

Usage of metamaterials in antenna element and total full-ceramic antenna module construction gives additional advantages. Basically, usage of metamaterials in the elements of antenna technique improve such parameters as coupled bandwidth, gain, selectivity, back radiation reductions and others.



a *b*

Fig. 1. A cup-shape antenna element construction (*a*) and navigation natenna module ASNK-1, based on it (*b*), having dimentions 48×44×19 mm



a *b*

Fig. 2. Amplitude (*a*) and polarization (*b*) radiation patterns of traditional (1) and uncased (2) antenna modules

a *b*

Fig. 3. A metamaterial-based antenna element construction (*a*) and navigation natenna module ASNK-3, based on it (*b*), having dimentions 30×30×12 mm

On fig. 3 a construction of a metamaterial-made antenna element and an uncased type antenna module, based on it are presented. This antenna element construction allows using substrates with the lower value of permittivity, what provides higher radiation efficiency. Also presented metamaterial-made antenna element has a meridian angle range with the axial ratio of less than 5 dB up to –80º…+80º (fig. 4), which only quadrifillar antennas also have [6]. Due to usage of low permittivity materials for the substrate, the presented antenna module has a lower weight and cost value. The antenna module has a flat and compact planar construction and due to this fact it can be implemented into any compact onboard or even on-body devices.

On fig. 5 an embedded receiving antenna module with a receiver chipset, made using uncased technology (fig. 5, *a*) and an analog of the module made using traditional technologies (fig. 5, *b*) are presented. Advantages of the uncased module are its complete tightness, simultaneous operation in L1 GLONASS/GPS, E1 GALILEO and B1 BEYDOU bands and better navigation signal reception, what is caused by the cup-shaped antenna element.

In our days the number of GNSS systems increases because of GALILEO and BEYDOU operation start, and also number of GNSS operating bands increases. Thus appears a necessity of creation of multifunctional devises, which simultaneously work with maximum number of GNSS in various (ideally in all) bands. It forces creation of patch antennas with extended operating band or multiband MSA. Usually the bandwidth of coupling with low noise amplifier is achieved by using the so called proximity antenna feeding [7; 8]. But this method forces multilayer PCB design.

For operation in widened bend (with more number of operating GNSS) we have proposed an antenna element, which has two planar segments with symmetry around the center of MSA [9; 10]. The first segment is a patch located in the center of the ceramic surface, while the second one is a square frame surrounding the first segment. Two segments have a distributed mutual coupling, what allows achieving antenna element matching with 50-Ohm feeding and invariable radiation pattern in L1 GLONASS/GPS, E1 GALILEO and B1 BEYDOU bands.

The proposed antenna element can be also designed to work in 2 bands, for example L1 and L2 GLONASS/GPS or L1 and L2 GPS/GALILEO.

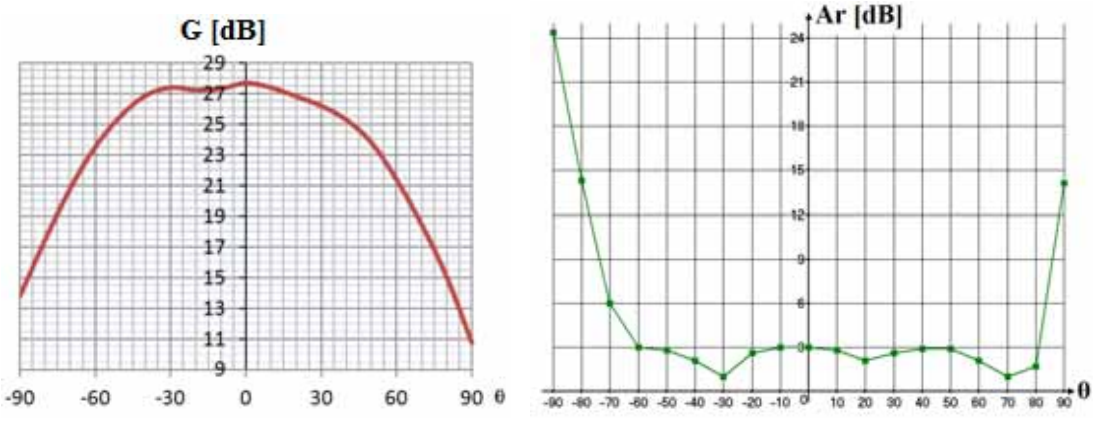
The designed active GNSS module based on the proposed antenna element which also contains a low noise amplifier with filters and overload protection for operation in L1, GLONASS/GPS, E1 GALILEO and B1 BEIDOU bands is presented on fig. 6. It can be seen, that the antenna element VSWR is lower than 3 in the band 1504–1631 MHz (fig. 6, *b*) and its axial ratio is not higher than 3 in the band 1540–1600 MHz (fig. 6, *c*).

The designed antenna module can be used as an independent embedded element of GLONASS/GPS/GALILEO navigation receivers, and also as a basic part of external antennas and antenna arrays.

During design of an antenna module, which is able to work simultaneously in all GLONASS/ GPS/ GALILEO/ BEYDOU GNSS operating bands it is possible to implement more complicated antenna element – a stacked MSA [11]. In the stacked antennas antenna elements for different bands are placed one above another in the way that antenna for higher frequencies are placed above antennas for lower frequencies. Each mentioned antenna serves as a ground plane for the antenna, placed above.

The main deficiency of multi frequency stacked MSA antennas is a high mutual influence of the antenna elements what causes radiation pattern distortion in each band and low mutual isolation of the antenna inputs. The mutual isolation of antenna inputs can be sometimes improved when using the special multi frequency MSA feeding nets, but the problem is not solved generally.

We have suggested a multi frequency stacked antenna design method with cross feeding of the antenna elements (fig. 7), which provides the antenna element isolation more than 25 dB and identical radiation patterns in separated bands (fig. 8).

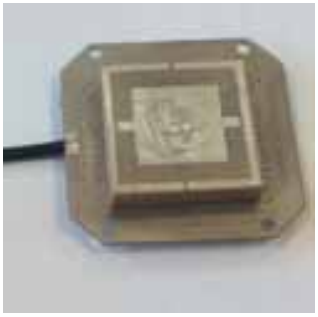


a *b*

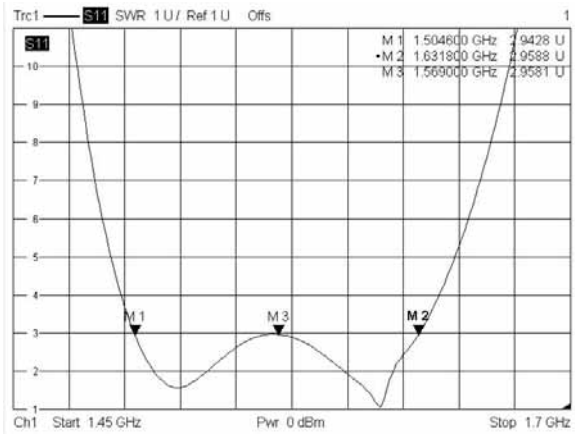
Fig. 4. Measured amplitude (*a*) and polarization (*b*) radiation patterns of navigation antenna module ASNK-3

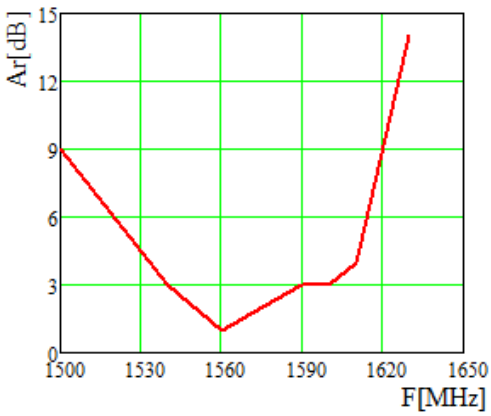
a *b*

Fig. 5. Full-ceramic antenna module PAM-2 (30×30×10 mm) (*a*)
and similar traditionally made ceaseless module (22×22×8) (*b*)



a





b *c*

Fig. 6. Dual band navigation antenna module ASNP-8 (30×30×10 mm) (*a*),
the antenna element VSWR (*b*) and axial ratio (*c*)

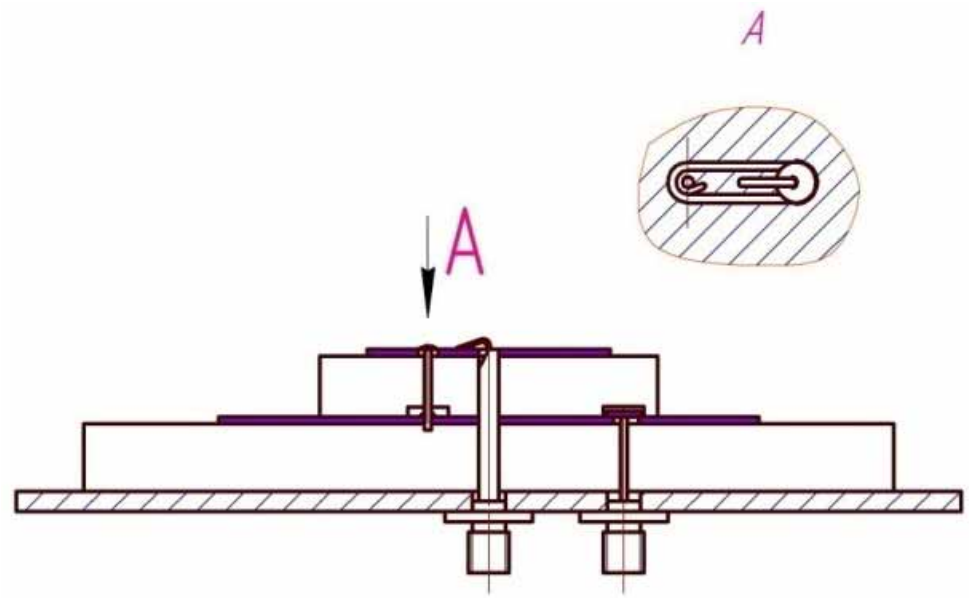
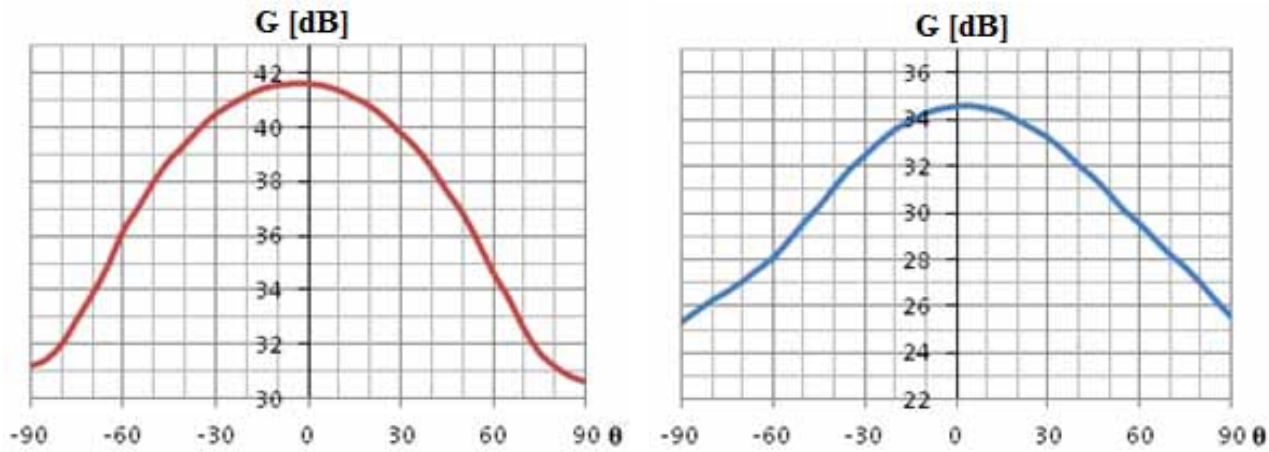


Fig. 7. Stacked patch antenna with cross feeding of antenna elements



a *b*

Fig. 8. Radiation patterns of the module AA2-KKS, based on stacked antenna with antenna elements cross feeding on the frequencies 1600 (*a*) and 1247 (*b*) MHz

In especial GNSS antenna application it is very impotent not to receive multipath signals. Multipath signal is a signal from the satellite, which was received by the antenna not directly, but after some reflections from earth or any constructions, which surround the antenna. This is the cause of a phase noise, which increases the mistake in determining co-ordinates.

Usually choke ring ground planes are used for multipath mitigating. But these constructions have a disadvantage of big size and weight. EBG metamaterials allow obtaining compact ground planes for GNSS antenna multipath mitigating [12–14].

But all multipath mitigating ground planes have a common deficiency – they spoil the antenna element phase center stability. In our antenna module ASNG-3 a special type of a EBG metamaterial (fig. 9) and a special method of EBG metamaterial multipath mitigating ground plane mounting is used, which has no such a deficiency [15].

The antenna module radiation patterns, taken on the frequencies 1590 MHz and 1236 MHz are presented on fig. 10. Diagrams show the wide radiation pattern in the top hemisphere and the maximum down-up ratio value minus 40 dBi in L1 band and minus 35 dBi in L2 band.

Using two antenna modules, installed stationary with the base between them 0.538 m, measurements of router point coordinates within 24 hours were made. On fig. 11 router point latitude and longitude deviations are presented as well.

It is seen from the diagram that most part of deviations are within ±2 mm what means that antenna phase center stability is not greater than 2 mm.

Conclusion. Thus, navigation antenna module design innovative approaches, provided in the paper, allow with the use of their combination obtaining devises with almost any characteristics collection for implementation in various GNSS equipment.

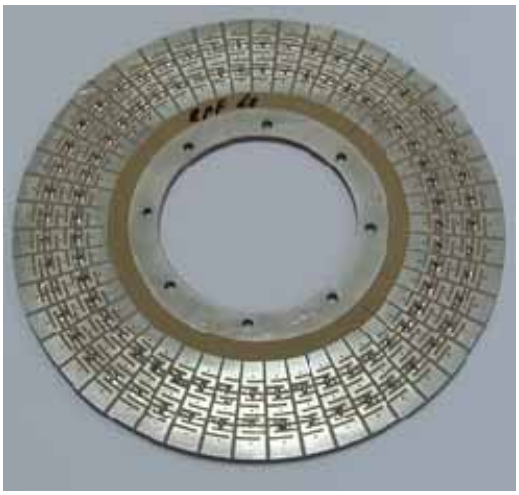
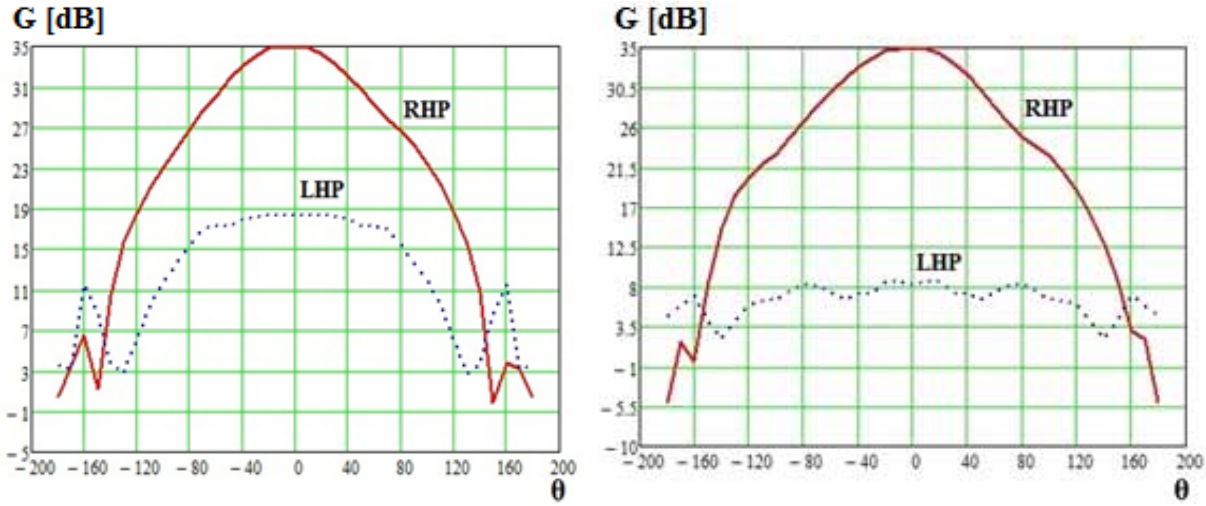


Fig. 9. EBG metamaterial ground plane



a *b*

Fig. 10. Radiation patterns of the module ASNG-3 on the frequencies 1236 (*a*) and 1590 (*b*) MHz

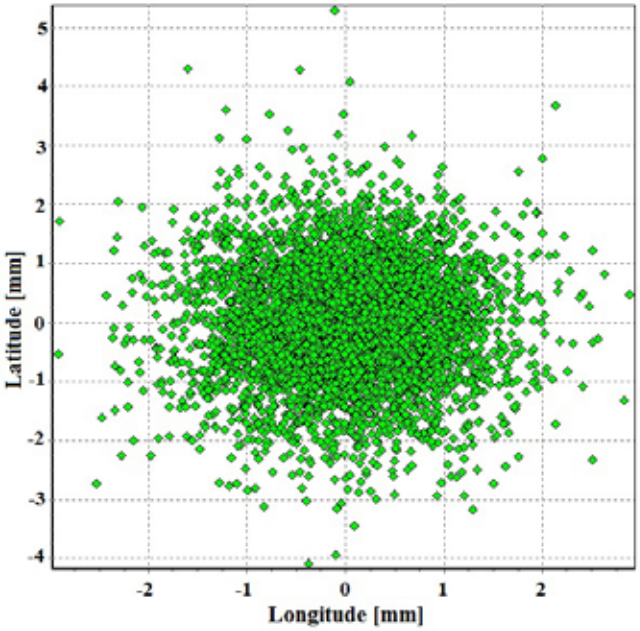


Fig. 11. Router point latitude and longitude deviations

Acknowledgments. Practical results, presented in the paper were obtained in the Institute of Space Device Engineering, based in Moscow, during continued work of antenna design department of the Institute.

Благодарности. Результаты, представленные в статье, были получены в Научно-исследовательском институте космического приборостроения в Москве в ходе продолжительной работы коллектива отдела разработки антенных устройств.

References

1. Balanis C. A. Modern Antenna Handbook, *John Wiley & Sons inc*., 2008, 1680 p.

2. Panchenko B. A., Nefedov Y. I. *Micropoloscoviye antenny* [Microstrip antennas], Moscow, Radio y svias Pabl., 1986, 145 p.

3. Rama Rao B., Kunysz W., Fante R. et al. GPS/GNSS Antennas, *Artech House*, 2012, 420 p.

4. Boyko S. N., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S. Miniaturization of satellite navigation system navigation equipment antenna modules. *2013 Loughborougn Antennas & Propagation Conference*, 2013, P. 102–105.

5. Boyko S. N., Kosiakin S. V., Kukharenko A. S. et al. [Miniaturisation of antenna modules of satellite navigation system navigation equipment], *Antenny*, 2013, No. 12, P. 38–44 (In Russ.).

6. Boyko S. N., Kosiakin S. V., Kukharenko A. S. et al. Metamaterial-made GNSS Antenna. *2014 Loughborougn Antennas & Propagation Conference*, 2014, P. 410–411.

7. Zhou Y., Chen C. C., Volakis J. L. Dual band proximity-feed patch antenna for tri-band GPS applications. *IEEE Transactions on AP*, 2007, Vol. 55, No. 1, P. 220–223.

8. Jing-Ya Deng, Li-Xin Guo, Ying-Zeng Yin and others. Broadband Patch Antennas Fed by Novel Tuned Loop. *IEEE Transactions on AP*, 2013, Vol. 61, No. 4, P. 2290–2293.

9. Avdonin V. Y., Boyko S. N., Isaev A. V. et al. A compact active dual-band GLONASS/GPS navigation antenna. *Loughborougn Antennas & Propagation Conference,* 2014, P. 683–684.

10. Avdonin V. Y., Boyko S. N., Isaev A. V. [Dual band active microstrip antenna with circular polarization]. *Antenny*, 2012, No. 8, P. 38–45 (In Russ.).

11. Li J., Shi H., Lim H. et al. Quad-band probe-feed stacked annular patch antenna for GNSS application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, 2014, Vol. 13, P. 372–375.

12. Baggen R., Martinez-Vazquez M., Leiss J. et al. Low profile GALILEO antenna using EBG technology. *IEEE Transactions on AP*, 2008, Vol. 56, No. 3, P. 667–674.

13. Ruvio G., Amman M. J., Bao X. Radial EBG Cell Layout for GPS Patch Antennas. *Dublin Institute of Technology, School of Electrical and Electronic Engineering*, Articles, 2009-06-18.

14. Tranquilla J. M., Cam J. P., Al-Rizzo H. M. Analysis of a choke-ring ground plane for multipath control in Global Positioning System (GPS) application. *IEEE Trans. on Antenna and Propagations*, 1994, Vol. 42, No. 7, P. 905–911.

15. Boyko S. N., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S. EBG Metamaterial Ground Plane Application for GNSS Antenna Multipath Mitigating. *IEEE International Workshop on Antenna Technology,* 2015, P. 178–181.

Библиографические ссылки

1. Balanis C. A. Modern Antenna Handbook. John Wiley & Sons inc., 2008, 1680 p.

2. Панченко Б. А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986. 145 с.

3. GPS/GNSS Antennas / B. Rama Rao [et al.]. Artech House, 2012. 420 p.

4. Boyko S. N., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S. Miniaturization of satellite navigation system navigation equipment antenna modules // Loughborougn Antennas & Propagation Conference. 2013. P. 102–105.

5. Миниатюризация антенных модулей навигационной аппаратуры спутниковых навигационных систем / С. Н. Бойко [и др.] //Антенны. 2013. № 12. С. 38–44.

6. Metamaterial-made GNSS Antenna / S. N. Boyko [et al.] // Loughborougn Antennas & Propagation Conference. 2014. P. 410–411.

7. Zhou Y., Chen C. C., Volakis J. L. Dual band proximity-feed patch antenna for tri-band GPS applications // IEEE Transactions on AP. 2007. Vol. 55, No. 1. P. 220–223.

8. Broadband Patch Antennas Fed by Novel Tuned Loop / Jing-Ya Deng [et al.] // IEEE Transactions on AP. 2013. Vol. 61, No. 4. P. 2290–2293.

9. A compact active dual-band GLONASS/GPS navigation antenna / V. Y. Avdonin [et al.] // Loughborougn Antennas & Propagation Conference. 2014. P. 683–684.

10. Авдонин В. Ю., Бойко С. Н., Исаев А. В. Двухдиапазонная активная микрополосковая антенна круговой поляризации // Антенны. 2012. № 8. С. 38–45.

11. Quad-band probe-feed stacked annular patch antenna for GNSS application / J. Li [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation. 2014. Vol. 13. P. 372–375.

12. Low profile GALILEO antenna using EBG technology / R. Baggen [et al.] // IEEE Transactions on AP. 2008. Vol. 56, No. 3. P. 667–674.

13. Ruvio G., Amman M. J., Bao X. Radial EBG Cell Layout for GPS Patch Antennas / Dublin Institute of Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Articles. 2009-06-18.

14. Tranquilla J. M., Cam J. P., Al-Rizzo H. M. Analysis of a choke-ring ground plane for multipath control in Global Positioning System (GPS) application // IEEE Trans. on Antenna and Propagations. 1994. Vol. 42, No. 7. P. 905–911.

15. Boyko S. N., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S. EBG Metamaterial Ground Plane Application for GNSS Antenna Multipath Mitigating // IEEE International Workshop on Antenna Technology. 2015. P. 178–181.

© Boyko S. N., Isaev A. V., Kosyakin S. V., Kukharenko A. S., Yaskin Y. S., 2015

УДК 621.396.67:629.78.01

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 875–880

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИКЛАДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕОРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ И АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВАХ

В. В. Двирный[1*], М. В. Елфимова[2], Г. В. Двирный[1], Е. Г. Пацкова[1]

[1]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск красноярского края, ул. Ленина, 52
[2]Сибирская пожарно-спасательная академия
Государственной противопожарной службы МЧС России
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Северная, 1
[*]E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru

Рассмотрена возможность теории технической совместимости (ТС) в космической технике и аварийно-спасательных средствах, а также проблемы противоречивости научно-технического прогресса. Рассмотрены примеры миниатюризации электронной аппаратуры в радиоэлектронных изделиях, а также низкой эксплуатационной совместимости в градостроении. Для решения подобных проблем были исследованы соответствующие научные и инженерно-практические возможности теории технической совместимости применительно к аварийно-спасательным средствам. В составе этих средств рассмотрены и космические аппараты связи. Описано понятие «механическая совместимость» и наиболее проблематичные расчеты на этапе проектирования. Представлена теория динамических расчётов на этапе проектирования для определения прочности конструкции, вычисления резонансных частот и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. Рассмотрено применение методов на практике с возможностью выполнения исследований на основании уравнений Лагранжа. Представлен пример конструирования с учетом теории технической совместимости для космических аппаратов. Рассмотрены правила конструирования изделий КА, где собственная частота конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Обоснована необходимость разработки прецизионной конструкции с высокой размеростабильностью. Представлен пример силовой анизогридной сетчатой конструкции для установки приборов СОС. Приведен пример расчетов на жесткость для силовой анизогридной сетчатой конструкции из композиционных материалов с использованием программного обеспечения. Представлены значения эффективных масс и частот конструкции. Рассмотрены возможности уменьшения влияния мехвоздействий с помощью повышения механической прочности и жесткости составных частей.

Ключевые слова: теория технической совместимости, аварийно-спасательные средства, динамические расчёты, математическая модель конструкции.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 875–880

PRACTICAL POTENTIAL OF TECHNICAL COMPATIBILITY THEORY AT SPACE ENGINEERING AND RESCUE EQUIPMENT

V. V. Dvirniy[1*], M. V. Elfimova[2], G. V. Dvirniy[1], E. G. Patskova[1]

[1]JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[2]Siberian Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia
1, Severnaya Str., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
[*]E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru

The paper presents the ability of a technical compatibility theory application at space engineering and rescue equipment. The examples of the miniaturization of electronic equipment in the radio-electronic products, as well as low interoperability in urban planning are given. For the solution of similar problems the corresponding scientific and engineering and practical capabilities of the theory of technical compatibility in relation for Emergency and rescue means were investigated. In the composition of means examined spacecrafts are considered. The concept “mechanical compatibility” and the most problematic calculations at a design stage are described. The authors describe dynamic analysis theory that can be used at design phase to determinate structural robustness of construction and to calculate resonant frequencies and exploitation loading. The application of methods in practice to perform investigations on the basis

of Lagrange equations is presented. The example design based on the theory of technical compatibility for spacecraft is given. The rules of designing of products KA where there shouldn't be their own frequency of a design are considered in a range of frequencies of external influences. The necessity of development of precision construction with high-dimensionally is presented. The example power anisogamy mesh design for installation of SOS devices is presented. An example of the calculations for stiffness anisogamy power grid structure made of composite materials using the software is given. The values of the effective mass and frequency structure are presented. The possibility of reducing the influence of mechanical effect by increasing the mechanical strength and rigidity of components is considered.

Keywords: theory of technical compatibility, rescue tools, dynamic calculations, mathematical model of construction.

Введение. Актуальность работы определяется обозначенными авторами проблемами, получившими отображение в названии формулировки целей, задач и прикладных решений.

Анализируя жизненный цикл становления и формирования теории технических систем как нового научно-технического знания, можно констатировать факт ускоренного его развития, начиная со второй половины прошлого века. Это связано с противоречивостью научно-технического прогресса, порождающего, с одной стороны, принципиально новые технические решения, а с другой – новые проблемы по методологическому обеспечению процесса практического применения этих решений [1]. Так, миниатюризация электронной аппаратуры позволяет значительно улучшить тактико-технические характеристики радиоэлектронных изделий, но в то же время порождает серьёзные трудности для методического обеспечения их тепловых режимов (тепловой совместимости), пожарной безопасности и электромагнитной совместимости [2].

Современная строительная техника позволяет возводить здания даже в сотни этажей. Но чем больше этажность зданий, тем проблематичнее они становятся в отношении пожаробезопасности, а также в случаях отказа и ремонта лифтов [3].

В приведённых примерах общей причиной является низкая эксплуатационная совместимость реализованных разработок. Это одна из мотиваций заметного изменения отношения инженерии и науки к проблеме обеспечения ТС.

Последнее обстоятельство побудило авторов статьи исследовать соответствующие научные и инженерно-практические возможности теории ТС применительно к аварийно-спасательным средствам. В составе этих средств рассмотрены и космические аппараты связи (КАС), создаваемые АО «Информационно-спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (г. Железногорск), как один из наиболее перспективных претендентов для построения современной отечественной системы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций (ЧС) [4–7]. Кроме того, КАС вполне могут служить примером для подражания в вопросах обеспечения качества и эффективности даже в условиях жёсткого прессинга конкурентов.

Изложенные в статье материалы могут дать сотрудникам МЧС полезные сведения по обеспечению механической совместимости при создании современной космической техники [8].

Теория технической совместимости. Механическая совместимость (МхС) – способность изделий функционировать с требуемым качеством при воздействии динамических механических нагрузок (мехвоздействий) в реальных условиях эксплуатации [9; 10].

На технику в процессе эксплуатации воздействуют вибрации, ударные нагрузки и линейные ускорения. Эти нагрузки могут повлечь деформации (остаточные и упругие), вплоть до разрушения конструктивных элементов. Даже упругая деформация может привести к появлению усталостных поломок, а в электрорадиоаппаратуре – ещё и прерывистого (блуждающего) электрического контакта, дугового разряда, образования радиопомех.

В обеспечении МхС современной техники наиболее проблематичными являются динамические расчёты на этапе проектирования для определения прочности конструкции, вычисления резонансных частот и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. При этом прежде всего выбирается динамическая (физическая) модель проектируемой конструкции (совокупность инерционных, упругих и демпфирующих элементов) с учётом спектральных составляющих динамического воздействия. Затем разрабатывается математическое описание этой модели, т. е. математическая модель конструкции, которая должна содержать замкнутую систему основных уравнений, а также способы задания начальных и граничных условий. Сложность конструкций современной техники такова, что моделирующие их упругие системы являются системами с бесконечным числом степеней свободы или системами с распределёнными параметрами, исследования которых весьма сложны и проводятся методами математической физики или вариационными методами. На практике обычно прибегают к упрощениям, предусматривающим переход от сложной системы к более простой, эквивалентной системе с одной или с конечным числом степеней свободы, являющейся системой с сосредоточенными параметрами, позволяющей выполнять исследования на основании уравнений Лагранжа.

При постановке задачи по определению динамических воздействий, начальных и граничных условий в качестве физической модели обычно рассматривают колебания стержней и пластин, поскольку последние наиболее часто применяются в несущих конструкциях. Далее находят граничные условия в зависимости от закона движения конца стержня и формируют краевые задачи для уравнения колебаний с учётом граничных условий. В монографии [17] подробно описаны шаги решения задачи по определению динамических воздействий, начальных и граничных условий.

В практике конструирования вибронагрузки задаются вполне определенными, нередко несколькими,

диапазонами частот. Так, для космических аппаратов связи расчёты осуществляются по диапазонам частот средств транспортировки (автомобиля, железнодорожного транспорта, самолёта) и средств выведения.

В правильно сконструированном изделии собственная частота f_0 конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Хотя любая конструкция обладает несколькими значениями собственных частот, расчёт выполняется только для низшего значения f_0. Если низшее значение f_0 входит в диапазон внешних воздействий, то конструкцию дорабатывают с целью увеличения этого значения f_0 и выхода его из спектра частот внешних воздействий. Для увеличения вибропрочности в конструкциях вводятся дополнительные крепления, рёбра и рельефы жёсткости, отбортовки, используются материалы с высокими демпфирующими свойствами, демпфирующие покрытия, а также специальные амортизаторы.

Пример механической совместимости. Рассмотрим пример разработки конструкции для установки приборов системы ориентации и стабилизации (СОС) [11]. В случае невозможности выполнения требования по непопаданию элементов в зону обзора (плотная компоновка приборов, антенн и др.), при размещении приборов СОС непосредственно на астроплате оптимальным решением является поднятие аппаратуры на определенную высоту. При этом появляется необходимость разработки прецизионных размеростабильных конструкций с достаточно высокими характеристиками по прочности и жесткости. Проектирование размеростабильных космических конструкций сегодня представляет собой самостоятельный класс задач, результаты которых широко востребованы современной промышленностью. Примерами таких конструкций являются крупногабаритные космические антенны, платформы и другие несущие конструкции для размещения высокоточной целевой аппаратуры, корпусы спутниковых телескопов и фотоаппаратов. Во всех этих случаях основным требованием, определяющим работоспособность конструкции, является сохранение заданных размеров при изменении различных характеристик окружающей среды (в первую очередь, температуры) [12; 13].

В существующих разработках АО «ИСС» поддерживающие конструкции реализуются либо в виде металлических кронштейнов (при небольшой высоте поднятия приборов СОС над астроплатой), либо в виде корпуса из сотопанелей с композитными обшивками (рис. 1).

Такая конструкция позволяет выполнять монтаж приборов СОС на значительном расстоянии от астроплаты, выполняя при этом требования по прочности и жесткости. Вместе с тем данное решение имеет ряд недостатков: высокая трудоемкость изготовления и сборки; необходимость установки дополнительных элементов крепления для выполнения монтажа бортовой кабельной сети по конструкции; достаточно высокая масса конструкции.

С целью разработки конструкции, лишенной перечисленных недостатков, была рассмотрена силовая анизогридная сетчатая конструкция из композиционного материала, используемая в платформах КА «Экспресс-1000» и «Экспресс-2000» [14].

Сетчатая конструкция образована из повторяющихся по толщине стенки оболочки слоев систем перекрещивающихся спиральных, продольных и кольцевых лент из однонаправленных нитей, скрепленных полимерным связующим, образующих спиральные, кольцевые, продольные и дополнительные ребра. Дополнительные ребра ориентированы в продольном направлении. Дополнительные ребра короче длины образующей и неравномерно распределены по длине и периметру. Сетчатая оболочка из композиционных материалов содержит спиральные, продольные, кольцевые и дополнительные ребра, а также дополнительные ребра с шириной, отличающейся от ширины спиральных, продольных и кольцевых ребер (рис. 2) [15; 16].

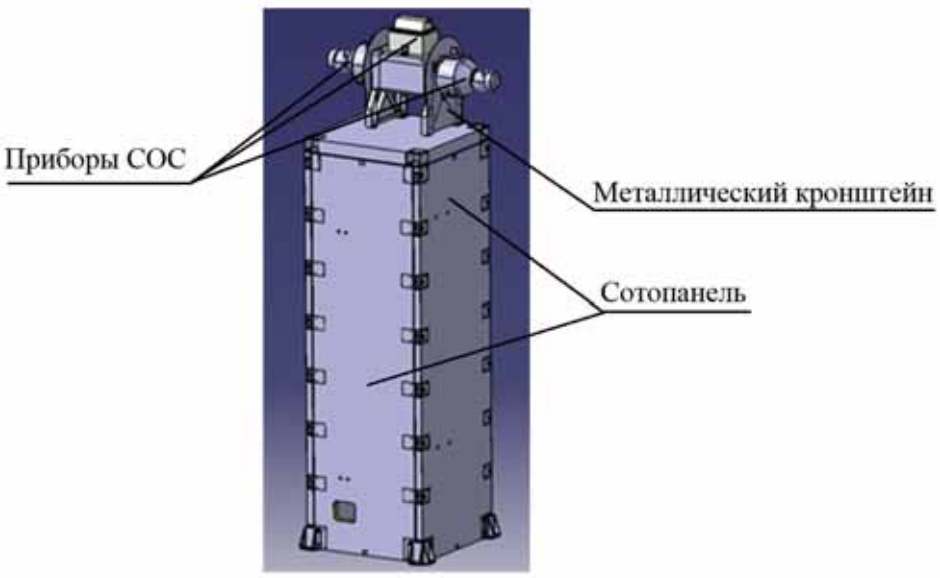


Рис. 1. Поддерживающая конструкция из сотопанелей

Анализ расчетов на жесткость. В рамках работ по созданию новой конструкции была выпущена 3D-модель конструкции (рис. 3) и проведены расчеты на жесткость (табл. 1) с использованием программного обеспечения UAI (Femap). Ребра сетчатой структуры описываются двухузловыми балочными элементами, нижний шпангоут – плоскими четырехузловыми элементами. При расчетах нижний торец жестко закрепляется, к верхнему нагрузка прикладывается через жесткий элемент. Напряженно-деформированное состояние конструкции при изгибе показано на рис. 3, а шкала справа обозначает силу, приложенную в верхней части этой конструкции.

Полученные результаты показали, что частота собственных колебаний конструкции – 20 Гц. Данное значение является недостаточным с точки зрения требований по жесткости (табл. 1). Значения *X*, *Y*, *Z* – перемещения по осям; *RX*, *RY*, *RZ* – суммарный вектор перемещений соответственно.

Одним из способов повышения собственной частоты конструкции является введение оболочки. После введения оболочки данная конструкция отвечает требованиям по жесткости.

Для определения оптимальных толщин ребер и оболочки был проведен механический анализ наиболее нагруженных узлов (места крепления конструкции к астроплате) средствами модуля генеративного анализа прочности в Femap.

В результате были определены значения для ребер 4×4 мм, для оболочки 1,2 мм (табл. 2).

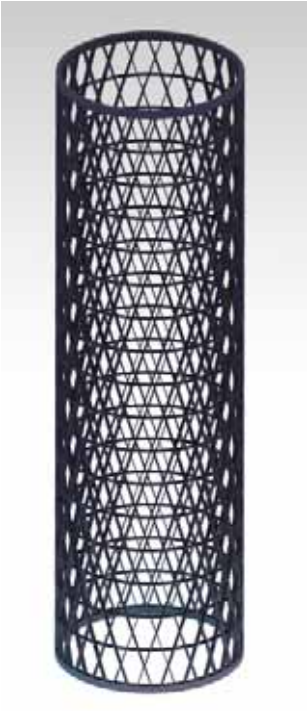


Рис. 2. Сетчатая конструкция для установки приборов СОС, выполненная из углепластика

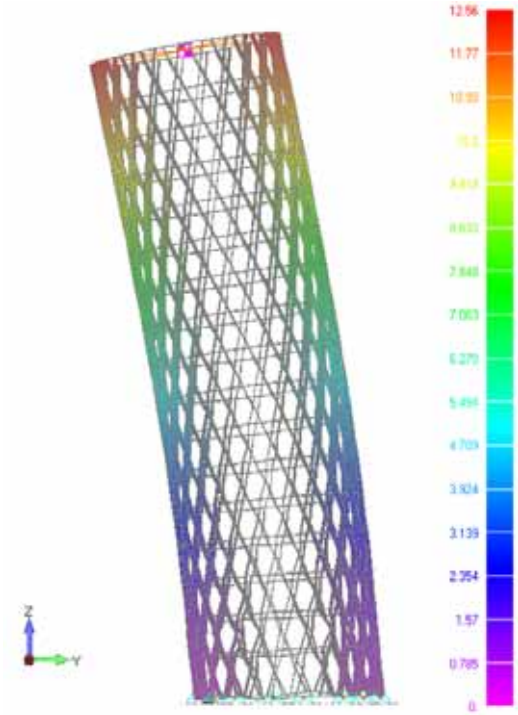


Рис. 3. Модель сетчатой конструкции для установки приборов СОС в 3D-изображении в нагруженном состоянии

Таблица 1

Значения эффективных масс и частот конструкции

Тон *N*	Частота, Гц	Эффективные массы, %					
		X	*Y*	*Z*	*RX*	*RY*	*RZ*
1	20,65	22,38	64,62	–	74,41	25,36	–
2	20,65	64,62	22,38	–	25,36	74,41	–
3	128,26	–	–	27,38	–	–	50,66
Итого		87,00	87,00	27,38	99,77	99,77	50,66

Таблица 2

Значения эффективных масс и частот конструкции с оболочкой

Тон *N*	Частота, Гц	Эффективные массы, %					
		X	*Y*	*Z*	*RX*	*RY*	*RZ*
1	115,72	90,22	1,35	–	1,48	98,52	–
2	115,72	1,35	90,22	–	98,52	1,48	–
3	1164,66	–	–	95,42	–	–	50,66
Итого		91,58	91,58	95,42	100,00	100,00	0,00

Заключение. В рамках работ по созданию новой конструкции была выпущена 3D-модель конструкции и проведены расчеты на жесткость с использованием программного обеспечения UAI (Femap).

Полученные результаты показали, что частота собственных колебаний конструкции 20 Гц является недостаточной. Для того, чтобы повысить собственную частоту конструкции, ввели оболочку. Для определения оптимальных толщин ребер и оболочки был проведен механический анализ наиболее нагруженных узлов. В результате были определены значения для ребер 4×4 мм, для оболочки 1,2 мм.

Анализ описанных конструкций показал, что наиболее универсальной является сетчатая композитная конструкция с оболочкой. Высокие характеристики по параметрам жесткости, прочности, вариантности исполнения и размеростабильности в сочетании с низкой массой позволяют использовать её на КА, различных как по типу (малые, среднего класса, тяжелые), так и по средствам выведения [14].

Уменьшения влияния мехвоздействий добиваются повышением механической прочности и жесткости составных частей и изделий в целом. Увеличение жёсткости составных конструкций достигается силовой затяжкой узлов сочленения, увеличением площади опорных поверхностей и жёсткости деталей на участках сопряжения.

Краткий экскурс в сложнейшие, трудоёмкие теоретические расчёты по обеспечению механической совместимости современной техники показал, что здесь, как и для теории вообще, последнее слово за экспериментом, подтверждающим правильность этих расчётов. Так, для КАС изготавливается и испытывается на динамических стендах отдельный технологический образец аппарата. Во время этих испытаний задаётся весь диапазон возможных эксплуатационных динамических нагрузок.

Следует отметить, что отечественные специалисты превосходно обеспечивают такой важный показатель МхС нашей техники, каким является прочность. Это видно на примерах обеспечения прочности ракетносителей и авиационной техники, автотранспорта (в том числе пожарного назначения), механической аварийно-спасательной техники. Но главная проблема здесь заключается в необходимости значительного улучшения габаритно-весовых характеристик технических, в том числе аварийно-спасательных, средств. Решение этой проблемы ведёт к повышению мобильности, удобству эксплуатации, снижению энергопотребления средств и, конечно, может быть выполнено только путём оптимизации их конструктивного построения, учитывающей результаты экспериментально-технологической отработки.

Масштабную проблему представляет снижение МхС по причине некачественного технического обслуживания и ремонта техники в процессе её эксплуатации. При этом известны даже случаи, когда изношенные детали оборудования самолетов заменяли ранее изношенными деталями, восстановленными кустарным способом в бытовых условиях.

Предотвращение таких и им подобных случаев, разумеется, входит в число важных задач процесса обеспечения МхС на этапе эксплуатации технических средств любого назначения [17].

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 30709–2002. Техническая совместимость. Термины и определения. Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. 4 с.
2. ГОСТ 30372–95/ГОСТ Р 50397–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1995. 9 с.
3. ГОСТ 34. 003–90. Информационная технология. Автоматизированные системы. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990. 17 с.
4. Антипин М. И. Анализ и выбор рационального проведения аэродинамической компоновки экраноплана : автореф. дис. … канд. техн. наук / М. И. Антипин; Иркутский гос. техн. ун-т. Иркутск, 2009. 22 с.
5. Артамонов В. С. [и др.] Надёжность технических систем и техногенный риск : учебник / под общ. ред. В. Н. Ложкина. СПб. : Санкт-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2007. 480 с.
6. Арустамов Э. А., Волощенко А. Е., Гуськов Г. В. Безопасность жизнедеятельности / под ред. проф. Э. А. Арустамова. М. : Дашков и К, 2001. 678 с.
7. Буше Н. А., Копытько В. В. Совместимость трущихся поверхностей. М. : Наука, 1981. 127 с.
8. Вальков В. М., Вершин В. Е. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Л. : Политехника, 1991. 269 с.
9. Гелль В. М., Иванов-Есипович Н. К. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры. Л. : Энергоатомиздат, 1984. 536 с.
10. Глушков В. М., Шихаев К. Н. Типовость и совместимость систем управления // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн. 1971. Вып. 24 (3). 9 с.
11. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
12. Смердов А. А. Анализ чувствительности при проектировании композитных размеростабильных космических конструкций // Наука и инновации : инженерный журнал. 2013. Вып. 7. 15 с.
13. Смердов А. А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники : дис. … д-ра техн. наук. М., 2008. 410 с.
14. Разработка прецизионных конструкций для размещения высокоточного оборудования / Е. Г. Пацкова [и др.] // Решетневские чтения : материалы XVII Междунар. научн. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. В 2 ч. Ч. 1. 2013. С. 90–91.
15. Пат. 2392122 Российская Федерация, C1 МПК B 32 B 1/08(2006.01), B 32 B 3/12(2006.01), B 64 C 1/00(2006.01), B 64 G 1/22(2006.01). Сетчатая оболочка вращения из композиционных материалов / Андронов А. И., Федоров В. В., Никитюк В. А., Разин А. Ф., Васильев В. В., Халиманович В. И. Заявка № 2008144082/11 от 07.07.2009.

16. Анизогридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике / В. В. Васильев [и др.] // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38–50.

17. Носенков А. А. Техническая совместимость: практика, наука, проблемы : моногр / Сиб. госуд. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005. 136 с.

References

1. GOST 30709–2002. *Tekhnicheskaya sovmestimost'. Terminy i opredeleniya* [State Standard 30709-2002. Technical compatibility. Terms and definitions], Minsk, Mezhgosud. sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii Publ., 2002, 4 p.

2. GOST 30372–95, GOST R 50397–92. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 30372–95, State Standard R 50397–92. Electromagnetic compatibility for electronic equipment. Terms and definitions], Moscow, Standartinform, 1995, 9 p.

3. GOST 34.003–90 *Informatsionnaya tekhnologiya. Avtomatizirovannye sistemy. Terminy i opredeleniya* [State Standard 34. 003–90. Information technology. Automated system. Terms and definitions], Moscow, Standartinform, 1990, 17 p.

4. Antipin M. I. *Analiz i vybor ratsional'nogo provedeniya aerodinamicheskoy komponovki ekranoplana. Dis. kand. tekhnich. nauk* [Analysis and rational choice of aerodynamic configuration WIG. Dis. Cand. tehn. Sci.]. Irkutsk, Irkutskiy gosudar. tehnich. univ-t Publ., 2009, 22 p.

5. Artamonov V. S., Baskin Yu. G., Gadyshev V. A., Lozhkin V. N., Chupriyan A. P. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk* [Reliability of technical systems and technological hazards]. 2007, Sankt-Peterburgskiy un-t Publ., 480 p.

6. Arustamov E. A., Voloshchenko A. E., Gus'kov G. V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and Safety]. Moscow, Dashkov i K Publ., 2001, 678 p.

7. Bushe N. A. [et al.] *Sovmestimost' trushchikhsya poverkhnostey* [Compatible rubbing surfaces], Moscow, Nauka Publ., 1981,127 p.

8. Val'kov V. M. [et al.] *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Automated process control systems], Leningrad, Politehnika Publ., 1991, 269 p.

9. Gell' V. M. [et al.] *Konstruirovanie i mikrominiaturizatsiya radioelektronnoy apparatury* [Design and microminiaturization electronic equipment], Leningrad Energoatomizdat Publ., 1984, 536 p.

10. Glushkov V. M., Shihaev K. N. [Types and compatibility of management systems]. *Voprosy radioelektroniki*. 1971, No. 24(3), P. 9 (In Russ.).

11. Chebotarev V. E. [et al.] *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Basics of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2011, 488 p.

12. Smerdov A. A. [The sensitivity analysis in the design of composite space structures dimensionally]. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii*, 2013, No. 7, 15 p. (In Russ.).

13. Smerdov A. A. *Razrabotka metodov proektirovaniya kompozitnykh materialov i konstruktsiy raketno-kosmicheskoy tekhniki: Dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of methods for the design of composite materials and structures rocket and space technology. Dr. eng. sci. dis]. Moscow, 2008. 41 p.

14. Patskova E. G., Iseeva O. A., Bikmaev R. I., Filimonov I. V., Sharnin A. E. [Development of precision design for precision equipment]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva "Reshetnevskie chteniya"* [Proceedings of the XVII International Scientific Conference dedicated to the memory of General Designer of rocket and space systems Academician M. F. Reshetnev "Reshetnev Readings"], Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2013, P. 90–91.

15. Andronov A. I. et al. *Setchataya obolochka vrashcheniya iz kompozitsionnykh materialov* [Retina of rotation of composite materials]. Patent RF, no 2392122, 2009.

16. Vasil'ev V. V., Barynin V. A., Razin A. F., Petrokovskiy S. A., Khalimanovich V. I. [Anizogridnye composite mesh design – development and application of space technology]. *Kompozity i nanostruktury*, 2009, No. 3, P. 38–50 (In Russ.).

17. Nosenkov A. A. *Tehnicheskaya sovmestimost: praktika, nauka, problemy* [Technical interoperability: the practice, science, problem]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2005, 136 p.

© Двирный В. В., Елфимова М. В.,
Двирный Г. В., Пацкова Е. Г., 2015

УДК 629.7.018.4

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 881–890

ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ ЛЁТНЫХ ПАРТИЙ К ДОЗОВЫМ ЭФФЕКТАМ ДЛЯ ГАРАНТИИ СТОЙКОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. М. Зыков[1], Ю. В. Максимов[2], И. А. Максимов[2], С. Г. Кочура[2], В. В. Иванов[2], А. В. Пацков[2*]

[1]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30
[2]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[*]E-mail: patskov@iss-reshetnev.ru

Рассмотрены основные результаты испытаний лётных партий электронных компонентов (ЭК) на дозовые эффекты длительного низкоинтенсивного воздействия ионизирующих излучений космического пространства. Используемый подход обеспечивает экспериментально-расчетную оценку проектного радиационного запаса компонента в аппаратуре на этапе комплектования бортовой аппаратуры космического аппарата. Испытательный комплекс для выборочных испытаний лётных партий ЭК включает в себя две гамма-установки панорамного типа с регулировкой мощности дозы гамма-излучения Co-60 в диапазоне от 0,1 до 0,01 рад/с, а также систему дозиметрии для калибровки поля гамма-излучения по поглощенной дозе в кремнии с неопределенностью не более 2,5 %. Результаты испытаний для биполярных компонентов российского производства показали, что радиационная стойкость компонентов в зависимости от мощности дозы может иметь различный характер, выражающийся как в увеличении, так и в снижении радиационной стойкости при уменьшении мощности дозы. Обнаружены эпизодические случаи неконтролируемых изменений в технологии производства компонентов, происходящие в течение времени менее года и приводящие к изменениям в радиационной стойкости по дозовым эффектам до порядка величины. При поглощенной дозе ниже 30 крад в биполярных ЭК эффект мощности дозы может проявляться исключительно в повышенной скорости восстановления параметров ЭК после облучения при высокой мощности дозы в процессе последующего отжига при комнатной или повышенной до 100 °С температуре. Установлено, что в условиях переменной во времени мощности дозы, моделирующей последствия мощной вспышки на Солнце, в ЭК биполярной технологии, которые характеризуются эффектом, противоположным эффекту ELDRS, наблюдается временный параметрический отказ. Обнаруженные дозовые эффекты предложено принимать во внимание при корректировке стандартных методов испытаний.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, космический аппарат, электронные компоненты, лётные партии, радиационное испытание.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 881–890

TESTING ELECTRONIC PARTS FROM FLIGHT LOTS ON DOSE EFFECTS FOR THE HARDNESS GUARANTEE OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT

V. M. Zykov[1], Yu. V. Maximov[2], I. A. Maximov[2], S. G. Kochura[2], V. V. Ivanov[2], A. V. Patskov[2*]

[1]National Research Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation
[2]JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
[*]E-mail: patskov@iss-reshetnev.ru

The main results for radiation testing electronic parts of flight lots on dose effects of long-time low-intensive influence of space ionizing radiation is observed. Such test approach provides for the given component a computational-experimental radiation design margin estimation, which is based on part's experimental radiation hardness determination at the stage of the spacecraft onboard equipment acquisition. The test complex includes two Co-60 panoramic gamma apparatuses with adjustment of gamma-radiation dose rate in a range from 0,1 rad/s to 0,01 rad/s, and a dosimetry system for calibration of a gamma-radiation field in terms of the dose absorbed in silicon with uncertainty no more than 2,5 %. The results of testing bipolar parts manufactured in Russia have shown that as the dose rate

decreases, radiation hardness depending on the change in the dose rate may either increase or decrease. Incidental uncontrollable changes in the production technologies of parts occurring within a period of time less than a year and causing changes in radiation hardness of parts on dose effects to an order of magnitude are found out. If the absorbed dose is less 30 krad for bipolar parts the dose rate effect can be found out on the basis of a higher recovery rate of parts parameters after irradiation at high dose rate in the course of the subsequent annealing at room or raised to 100 °C temperature. It is shown that under the conditions of the time-varying dose rate that models aftereffects of high-power Sun flash, the bipolar parts characterized by the effect opposite to ELDRS, temporary parametric failure is detected. The discovered dose effects are offered to be taken into consideration when updating the standard test methods.

Keywords: onboard equipment, spacecraft, electronic parts, flight lots, radiation test.

Введение. В мировой практике, начиная с конца 1990-х годов, проведение радиационных испытаний лётных партий (RLAT) электронных компонентов (ЭК) осуществляется ведущими космическими корпорациями в рамках созданных этими корпорациями систем гарантии радиационной стойкости бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов (КА) [1]. Организация таких испытаний в рамках одной корпорации была вызвана многочисленными фактами существенного (до порядка величины) разброса радиационной стойкости ЭК лётных партий от партии к партии и внутри партии из-за нестабильности технологии производства, а также из-за влияния на радиационную стойкость ЭК дополнительных термовоздействий, таких как электротермотренировка, в процессе проведения дополнительных отбраковочных испытаний, проводимых в специализированных испытательных центрах. При этом разброс стойкости ЭК лётных партий к длительному низкоинтенсивному воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП) оказался сильно зависящим от вариаций процессов оксидирования и корпусирования микросхем каждой партии. В настоящее время испытания лётных партий ЭК стали важным условием гарантии стойкости БА к дозовым эффектам длительного низкоинтенсивного ионизирующего воздействия. Они проводятся, если по результатам сертификационных испытаний ЭК лётных партий коэффициент проектного радиационного запаса для размещения этих ЭК в бортовой аппаратуре меньше необходимого значения. В настоящее время разработаны статистические методы оценки радиационной стойкости ЭК закупаемых партий для комплектования БА, основанные не только на априорных данных сертификационных испытаний, но также на накопленных данных при предыдущих испытаниях лётных партий этих ЭК [2; 3]. Такие методы учитывают полученную при испытаниях лётных партий статистику колебаний радиационной стойкости от партии к партии и внутри партии. Вместе с тем подтверждено, что только непосредственное выборочное испытание ЭК закупленной лётной партии дает наиболее достоверную оценку проектного радиационного запаса (RDM) этого ЭК в конкретном космическом проекте. Далее организационные и методические вопросы испытаний лётных партий ЭК рассматриваются на примере интегрированной испытательной структуры, созданной в г. Томске в рамках системы гарантии радиационной стойкости БА КА кооперации предприятий АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва».

Цели испытаний лётных партий ЭК. Основной целью испытаний лётных партий ЭК является оценка проектного радиационного запаса этих ЭК для установки в бортовую аппаратуру с учетом натурной радиационной обстановки для разрабатываемого космического проекта, конструктивного исполнения бортовой аппаратуры КА, а также компоновки и электрического режима ЭК в составе аппаратуры. Исходя из накопленного опыта испытаний лётных партий ЭК к дозовым эффектам, в отличие от проведения типовых сертификационных испытаний, следует учитывать, что процедуры испытаний лётных партий ЭК должны обеспечивать:

– оценку радиационной стойкости ЭК в партии по количественному, а не по качественному признаку, что даёт возможность выполнения компоновки аппаратуры с учётом экранировки менее стойких ЭК более стойкими, а также обеспечивает возможность обоснованного выбора локальной радиационной защиты;

– количественную оценку радиационной стойкости ЭК лётной партии в электрических режимах эксплуатации на борту КА (которые могут отличаться от рекомендации в ТУ);

– оценку влияния электрического и теплового (отжиг при повышенной и нормальной температуре) режимов на функционирование ЭК после достижения радиационного параметрического отказа или достижения нормы испытаний с целью получения информации о возможности восстановления параметрического запаса работоспособности ЭК регулировкой электрического и теплового режимов при эксплуатации этих ЭК в составе БА;

– оценку разброса стойкости ЭК в лётной партии и от партии к партии с определением возможности индивидуальной разбраковки ЭК в каждой партии по их радиационной стойкости;

– оценку влияния на радиационную стойкость ЭК эффектов низкой мощности дозы.

Таким образом, при указанных выше целевых установках гарантия стойкости БА обеспечивается своевременным уточнением проектного радиационного запаса испытуемого ЭК лётной партии для конкретной БА.

Особенности испытаний лётных партий ЭК. Особенности испытаний лётных партий ЭК на дозовые эффекты длительного низкоинтенсивного ионизирующего воздействия определяются, с одной стороны, натурными радиационными условиями худшего случая и, с другой стороны, возможностями методов ускоренной количественной оценки стойкости ЭК к дозовым эффектам в сроки, предусмотренные

разработкой БА. Методика испытаний ЭК лётных партий должна включать процедуры количественной оценки радиационной стойкости ЭК, а испытательное оборудование должно быть представлено испытательными стендами с широким диапазоном регулировки мощности дозы для оценки возможных эффектов низкой мощности дозы. Обязательным является наличие высокоточной системы дозиметрии, способной работать в режиме on-line, а также аппаратуры для контроля электрических параметров и функционирования испытуемых ЭК различного уровня интеграции с необходимым программным обеспечением.

В связи с тем, что термовоздействия типа электротермотренировок, проводимых в процессе дополнительных отбраковочных испытаний ЭК в специализированных испытательных центрах, могут влиять на проявление эффектов низкой мощности дозы и на разброс стойкости ЭК по дозовым эффектам внутри партии для ЭК как биполярной технологии [4], так и КМОП-технологии [5], необходимо радиационные испытания лётных ЭК проводить после окончания дополнительных отбраковочных испытаний в специализированном испытательном техническом центре. Как известно, лётные партии ЭК подвергаются дополнительным отбраковочным процедурам в аккредитованных испытательных технических центрах, включая:

– электротермотренировку в составе отбраковочных испытаний и диагностический неразрушающий контроль каждой партии ЭК, предназначенной для применения в лётном комплекте БА;

– разрушающий физический анализ, проводимый в соответствии с требованиями НТД на выборке из закупленной партии ЭК.

При выборе верхнего предела мощности поглощенной дозы 0,1 рад/с принималась во внимание максимальная мощность дозы ионизирующего излучения, когда-либо наблюдавшаяся в натурных условиях после мощной вспышки на Солнце.

На рис. 1 приведена временная зависимость [6] изменений мощности поглощенной дозы (по кремнию) на геостационарной орбите за эквивалентной радиационной защитой из 2,54 мм алюминия в результате мощнейшей солнечной вспышки в октябре 1989 года. Видно, что последствия солнечной вспышки наблюдались в виде многодневных вариаций мощности дозы в диапазоне от 0,001 до 0,1 рад/с с максимальным значением в области 0,1 рад/с и дополнительными максимумами в области 0,01 рад/с при последующем спаде ниже 0,001 рад/с. Поэтому нижнюю границу основного диапазона мощности дозы при наземных испытаниях целесообразно выбрать равной 0,01 рад/с, в том числе для обеспечения приемлемых сроков испытаний. Такой же диапазон мощности дозы (от 0,1 до 0,01 рад/с) принят в стандарте ESA № 22900 в качестве нижнего базового диапазона для приемочных испытаний партий ЭК. С другой стороны, стандарт MIL-STD-883J (Method 1019.9) рекомендует для испытаний неизменную мощность дозы 0,01 рад/с. Однако недавно проведенные сравнительные исследования испытаний по действующим стандартам № 22900 и MIL-STD-883J (Method 1019.9) [7] показали, что худший случай при испытаниях биполярных ЭК может реализоваться не только при мощности дозы 0,01 рад/с, но при 0,1 рад/с.

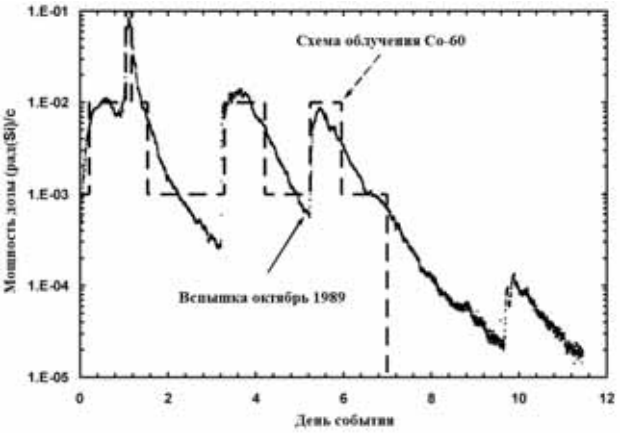


Рис. 1. Изменения мощности поглощенной дозы (по кремнию) на геостационарной орбите за защитой 2,54 мм Al после вспышки на Солнце в октябре 1989 года

Если исходить из типичного для геостационарной орбиты требования к радиационному ресурсу ЭК в 100 крад, то диапазон регулировки мощности дозы в пределах от 0,1 до 0,01 рад/с обеспечивает за 3 месяца набор указанной поглощенной дозы 100 крад при облучении с мощностью дозы 0,01 рад/с и набор поглощенной дозы 1 Мрад при облучении с мощностью дозы 0,1 рад/с. Этого достаточно для реализации при компоновке БА принципа минимизации массы радиационной защиты на основе экранировки менее стойких компонентов более стойкими. На этом же рис. 1 приведена временная зависимость мощности поглощенной дозы при имитации солнечной вспышки в лабораторных условиях гамма-излучением радионуклида Co-60.

Другие особенности методологии испытаний лётных партий ЭК обсуждаются ниже на примере специально разработанного моделирующего гамма-комплекса «Радиан».

Учитывая сформулированные выше требования к диапазону мощности дозы для проведения испытаний лётных партий, был разработан моделирующий гамма-комплекс «Радиан», основой которого стала радиационная головка гамма-терапевтического аппарата «Рокус», используемая как излучатель панорамного типа. В случае зарядки «Радиана» гамма-источником Co-60 активностью до 8,2 кКюри можно за счет геометрической расходимости гамма-пучка, путем регулировки расстояния до объекта облучения, обеспечить необходимое изменение мощности дозы, охватывающее до трех порядков величины. При этом за счет начальной угловой расходимости пучка гамма-излучения обеспечены достаточно большие размеры площади облучения для испытуемых выборок ЭК, подвергаемых длительному низкоинтенсивному облучению. Общий вид дистанционно-управляемого излучателя гамма-комплекса «Радиан» представлен на рис. 2.

Рис. 2. Панорамного типа Co-60 гамма-излучатель комплекса «Радиан»

Система дозиметрии базируется на использовании двух образцовых дозиметров универсальных ДКС-101, снабженных миниатюрной ионизационной камерой типа БМК-06 объемом 0,6 см^3. При измерении поглощенной дозы ионизационная камера располагается на плате между испытуемыми ЭК и обеспечивает погрешность измерения поглощенной дозы 2 % (по кремнию). Для измерения радиального распределения пучка гамма-излучения используется дозиметрическая система, состоящая из образцового дозиметра универсального ДКС-101 с миниатюрной ионизационной камерой типа БМК-06 и координатно-позиционирующего устройства (планшета) типа УКП-1510, которые работают под управлением единой программы, обеспечивая автоматическое проведение измерений с заданным шагом по двум координатным направлениям. Точность позиционирования ионизационной камеры равна 0,5 мм, а скорость программного перемещения ионизационной камеры вдоль координатных направлений достигает 100 мм/с.

При испытаниях средняя мощность дозы и максимальная неравномерность поля излучения для испытуемой выборки ЭК, находящейся в данной секции контейнера, находятся по результатам измерений мощности дозы в 5 точках платы (четырех периферийных и одной центральной).

Формирование и метрологическая аттестация поля гамма-излучения гамма-комплекса «Радиан» детально описаны в работе [8]. По результатам метрологической аттестации стенда «Радиан» неопределенность калибровки поля гамма-излучения по мощности поглощённой дозы в кремнии составила 2,5 % в диапазоне от 0,1 до 0,01 рад/с.

Контрольное и измерительное оборудование для тестирования параметров испытуемых ЭК (включая интегральные микросхемы различного уровня интеграции) состоит из оборудования испытательного технического центра АО «НПЦ «Полюс», оборудования гамма-комплекса «Радиан», обеспечивающего измерения в режиме on-line, и универсального измерительного оборудования, находящегося в помещении, смежном с гамма-комплексом «Радиан». Универсальное контрольно-измерительное оборудование состоит из аналоговой измерительной системы, построенной на базе измерительного комплекса ДМТ-419 (фирмы DMT), и цифровой системы тестирования на базе ATE-IC 52 фирмы National Instruments. Обе системы функционируют как независимо, так и по единой комплексной программе, позволяя тестировать микросхемы практически любой сложности, изготовленные по любой технологии (от микропроцессоров и ПЛИС до операционных усилителей и дискретных элементов).

Дополнительное испытательное оборудование обеспечивает процедуру отжига испытуемой выборки ЭК в активном электрическом режиме при повышенной температуре после окончания пошагового облучения.

Система оперативного контроля за испытаниями снабжена специальным программным обеспечением, которое дает оператору текущую информацию о типе испытуемого ЭК, номере производственной партии, номере маршрутного листа, координатах размещения в поле облучения (номере контейнера), норме испытаний, текущей и следующей шаговой дозе, времени до измерения параметров на очередном шаге облучения, времени окончания радиационных испытаний, а также о состоянии аппаратуры для поддержания заданного активного электрического режима этого ЭК.

Используемый подход при испытаниях лётных партий ЭК, в отличие от методики сертификационных испытаний, характеризуется рядом особенностей, связанных с её целевыми установками и, в частности, с необходимостью классификации испытуемой партии ЭК по следующей шкале: стойкость существенно ниже нормы ТУ, стойкость соответствует норме ТУ и стойкость существенно превышает норму ТУ. Это обеспечивает достижение целевой установки обнаружения аномально «плохих» и аномально «хороших» закупленных партий ЭК с выдачей разработчикам БА КА необходимой информации для расчета локальной защиты ЭК, имеющих аномально низкую стойкость, а также получения необходимой информации для оптимизации компоновки КА с экранированием аномально нестойких ЭК аномально стойкими. Поэтому важной особенностью методики является обязательный пошаговый набор дозы и, по возможности, количественная, а не качественная оценка стойкости ЭК

испытуемой лётной партии ЭК к дозовым эффектам. Для этого пошаговое облучение испытуемой выборки ЭК проводится до достижения параметрического отказа всех ЭК выборки или до достижения дозы, соответствующей так называемому интересующему уровню облучения, который существенно превышает норму испытаний. По результатам испытаний оценка стойкости партии ЭК выполняется на основе сравнения одностороннего толерантного предела, вычисляемого на основе статистической обработки данных испытаний, например, по ГОСТ Р ИСО 16269-6–2005 [9] с допустимым значением критериального параметра ЭК. Стандартная статистическая обработка результатов испытаний лётных партий [1] состоит из следующих процедур:

1. На каждом шаге по поглощенной дозе из измеренного распределения значений критериального параметра определяются среднее выборочное значение параметра $I_{ср}$ и среднеквадратичное отклонение S.

2. В зависимости от требований по надежности аппаратуры выбирается вероятность сохранения работоспособности ЭК в условиях применения (например, $P_S = 0{,}99$) и доверительность (например, $C = 0{,}9$).

3. Для каждого шага по набранной дозе величина одностороннего толерантного предела находится по формуле

$$I_{tol} = I_{ńd} \pm K(P_S, C, N) \cdot S,$$

где знак плюс соответствует параметру, возрастающему по мере увеличения дозы облучения, знак минус соответствует убывающему параметру. Коэффициент $K(P_S, C, N)$ зависит от доверительности C, вероятности выживания P_S, объема испытуемой выборки $N = 10$ и определяется по табличным значениям.

4. Точка пересечения линии одностороннего толерантного предела с допустимым по ТУ значением параметра (на рис. 3 это соответствует дозе 32 крад) дают значение дозы, для которой 99 % компонентов данной партии выживут с вероятностью 90 %.

Пример оценки стойкости ИС на основе критерия одностороннего толерантного предела, построенного для доверительности 0,9 и вероятности выживания 99 % с учетом объема испытуемой выборки $N = 10$, представлен на рис. 3, где изображена пошаговая дозовая зависимость входного тока операционного усилителя, являющегося критериальным параметром по результатам испытаний на дозовые эффекты.

Ещё одной особенностью методики испытаний лётных партий ЭК является проведение дополнительных процедур, следующих за процедурами оценки радиационной стойкости ЭК. Эти процедуры направлены на определение возможности восстановления работоспособности ЭК после произошедших критических радиационных изменений параметров ЭК на основе изменения электрического режима питания, а также за счет выдержки при повышенной до 100 ºС температуре (типично в течение 168 часов). Эта информация может оказаться полезной при возникновении нештатной ситуации на борту КА. Кроме того, дополнительная выдержка ЭК в активном электрическом режиме при комнатной температуре после окончания пошагового облучения в течение времени от 24 часов до нескольких суток может дать полезную информацию о влиянии на оценку радиационной стойкости времязависимых эффектов.

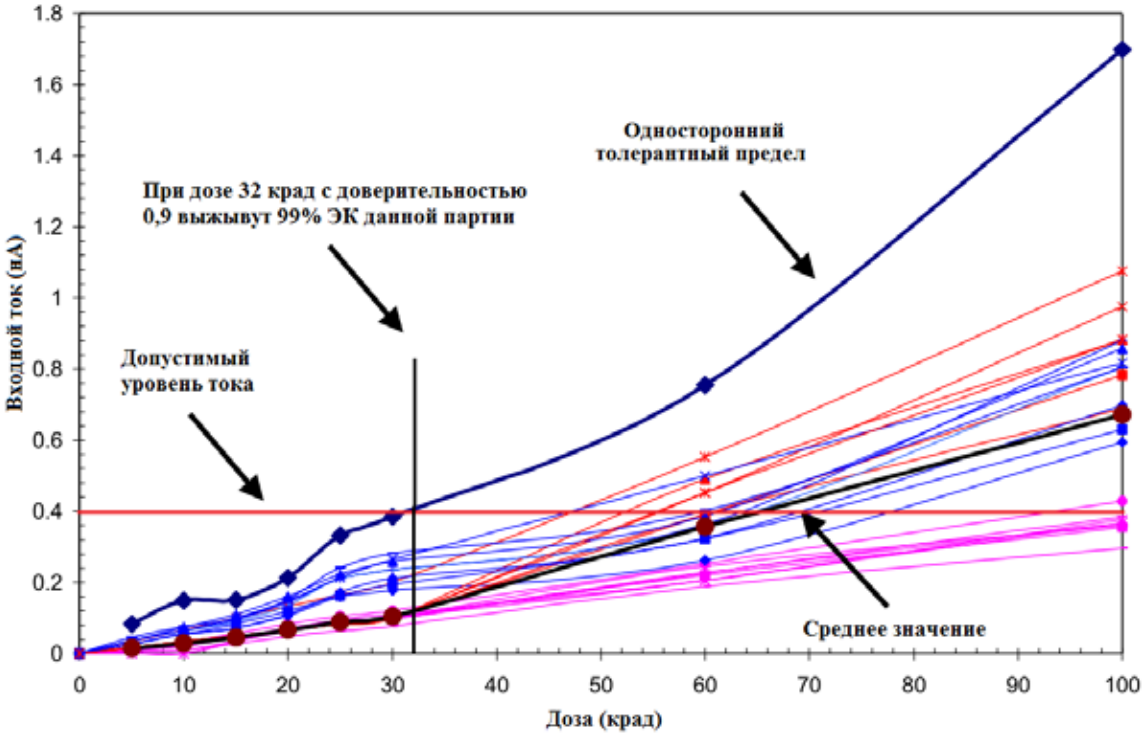


Рис. 3. Пример оценки радиационной стойкости ЭК партии методом одностороннего толерантного предела [1]

Оценка эффектов низкой мощности дозы важна для экстраполяции экспериментальных результатов проведенных ускоренных испытаний на натурные условия длительного низкоинтенсивного воздействия. Примером может служить часто наблюдаемый в ЭК биполярной технологии эффект ELDRS, для учета которого в НТД предлагается использовать степенной закон пересчета результатов ускоренных испытаний биполярных ЭК на натурные условия их применения:

$$D_{\text{Í ČČ}} = D_{\text{ŇÓ}} \cdot Đ^{n}_{\text{YĘŃ}} \big/ P^{n}_{\text{ČŃĎ}},$$

где $D_{\text{НИИ}}$ – уровень стойкости ЭК при низкой мощности поглощенной дозы, соответствующей условиям эксплуатации, рад; $D_{\text{ТУ}}$ – уровень стойкости ЭРИ в соответствии с техническими условиями (ТУ) или официальными справочными данными, рад; n – коэффициент аппроксимации зависимости уровня стойкости испытываемых образцов от мощности дозы, который в соответствии с НТД для биполярных ИС имеет рекомендуемое значение 0,26. По результатам выборочных испытаний в активном электрическом режиме лётных партий ЭК биполярной технологии российского производства на испытательном гамма-комплексе «Радиан» была установлена закономерность, касающаяся обнаружения для некоторых ЭК эффекта низкой мощности дозы, противоположного эффекту ELDRS.

Примером микросхем биполярной технологии, демонстрирующих эффект низкой мощности дозы, противоположный эффекту ELDRS, является операционный усилитель (ОУ) типа 140УД26АС1ВК ОСМ. Результаты испытаний 140УД26АС1ВК ОСМ при изменении мощности дозы гамма-излучения в диапазоне от 0,01 до 0,29 рад(Si)/с представлены на рис. 4.

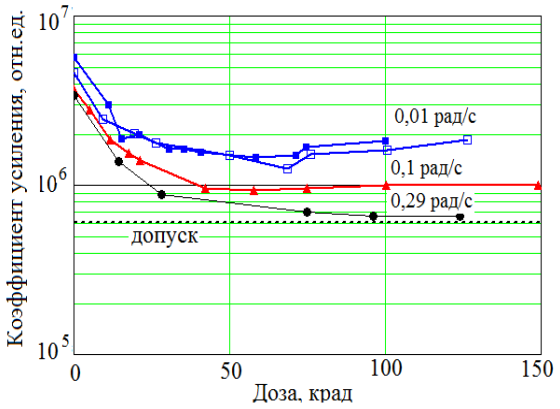


Рис. 4. Демонстрация эффекта анти-ELDRS для дозовой зависимости усредненного по испытуемой выборке коффициента усиления ОУ 140УД26АС1ВК при облучении с мощностью дозы в диапазоне от 0,01 до 0,29 рад(Si)/с

Испытаниям подвергались три партии 140УД26АС1ВК выпуска 2010 года с разбросом в дате изготовления в пределах 18 недель. Кроме того, при мощности дозы 0,01 рад(Si)/с была дополнительно испытана партия 140УД26АС1ВК выпуска 2012 года. Видно, что радиационная стойкость растет по мере уменьшения мощности дозы облучения. Длительный (168 часов) отжиг при температуре 100 ºС, выполненный после окончания облучения 140УД26АС1ВК ОСМ, показал, что после облучения при более высокой мощности дозы в процессе отжига не наблюдается полной обратимости радиационных изменений коэффициента усиления. Для эффекта, противоположного эффекту ELDRS, показатель степени в формуле, описывающей степенной закон влияния мощности дозы излучения на радиационную стойкость, становится отрицательным, и применимость указанного степенного закона для пересчета стойкости к натурным условиям эксплуатации требует отдельного подтверждения.

Обнаружение аномально «плохих» лётных партий ЭК с количественной оценкой радиационной стойкости – важнейшая целевая установка испытаний лётных партий ЭК. Процедура количественной оценки радиационной стойкости обеспечивает возможность выбора дополнительной локальной защиты ЭК из «плохой» партии в случае применения её в бортовой аппаратуре при несоответствии норме испытаний и при отсутствии эквивалентной замены на другие более радиационно стойкие ЭК.

Нормативные документы по методам испытаний на дозовые эффекты ЭК биполярной технологии предусматривают периодичность испытаний партий ЭК сроком в 1 год, если в процессе производства не проводится контроль радиационной стойкости. В процессе испытаний лётных партий ЭК нами были установлены эпизодические случаи неконтролируемых изменений в технологии производства, происходящие в течение времени менее года и приводящие к незначительным изменениям в радиационной стойкости ЭК по дозовым.

Пример значительных вариаций радиационной стойкости ЭК от партии к партии на примере источника опорного напряжения ОСМ Н142ЕН19 представлен в работе [10].

Оценка воздействия на ЭК биполярной технологии последствий мощной вспышки на Солнце имеет значение для ЭК с аномальным эффектом мощности дозы.

Закономерности радиационных изменений параметров биполярных ЭК при существенной вариации (в сторону увеличения) мощности дозы, имитирующей, в частности, последствия вспышки на Солнце, можно проследить на примере операционного усилителя 140УД25АС1ВК. Наблюдаемые при увеличении мощности поглощенной дозы от 0,01 до 0,1 рад/с радиационные изменения параметров ОУ выражаются в резком росте напряжения смещения и входных токов, а также в резком увеличении разброса параметров ОУ в испытуемой выборке. На рис. 5 представлен результат испытаний выборки ОУ 140УД25АС1ВК объёмом 10 образцов с переключением мощности дозы с 0,01 на 0,1 рад/с после набора дозы 17,7 крад.

На этом же рисунке приведены результаты отжига ОУ при комнатной и повышенной температуре после окончания облучения, которые свидетельствуют о возврате входного тока в пределы допуска в процессе отжига. Таким образом, в результате воздействия, имитирующего последствия вспышки на Солнце, за короткое время ОУ переходит в нестабильное состояние, характеризующееся смещением параметров за пределы нормы примерно на период времени длительности этого воздействия.

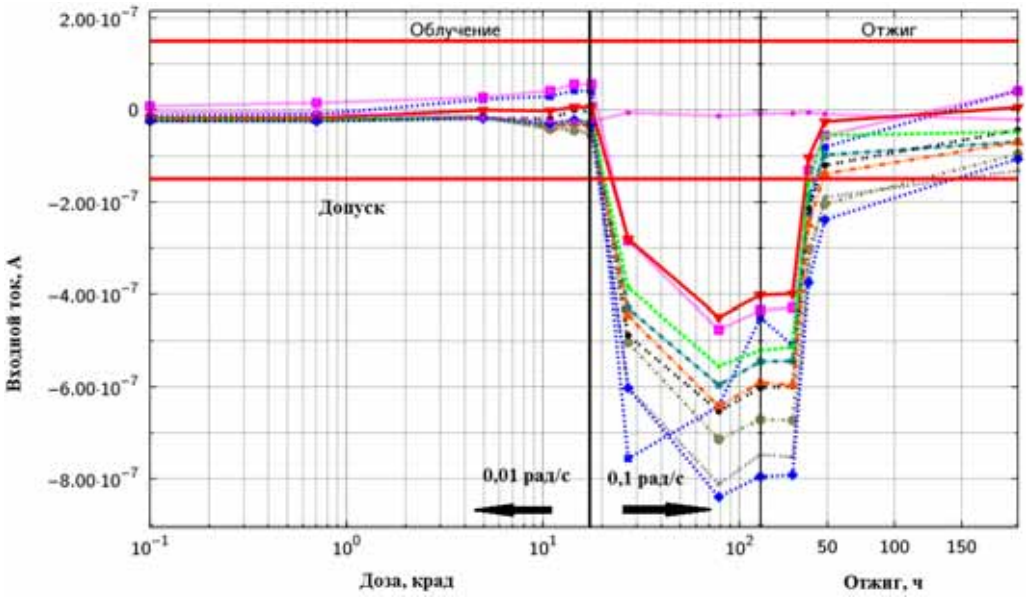


Рис. 5. Изменение с выходом за допустимые пределы входного тока 140УД25АС1ВК при росте в процессе облучения мощности дозы с 0,01 до 0,1 рад/с

Обсуждение результатов исследований. Полученные результаты исследований радиационной стойкости ЭК лётных партий к дозовым эффектам свидетельствуют о том, что:

– изменение радиационной стойкости различных типов ЭК биполярной технологии по мере приближения к натурным условиям за счет уменьшения мощности дозы ионизирующего излучения может иметь различную направленность, приводя как к уменьшению, так и к увеличению радиационной стойкости ЭК к дозовым эффектам;

– при полной дозе облучения ниже 30 крад, когда ещё отсутствует проявление эффекта ELDRS, значительная доля радиационных изменений параметров биполярных ЭК может отжигаться при комнатной или повышенной до 100 °С температуре после окончания облучения при высокой мощности дозы облучения, в то время как после облучения до этой же дозы при низкой мощности дозы, т. е. в условиях, более приближенных к натурным условиям, значительный отжиг параметров после облучения отсутствует;

– изменения в технологии производства биполярных ЭК могут эпизодически приводить к кратковременным незначительным вариациям радиационной стойкости ЭК к дозовым эффектам от партии к партии и внутри партии;

– для ЭК биполярной технологии, характеризующихся эффектом, противоположным эффекту ELDRS, последствия вспышки на Солнце могут проявляться в параметрическом отказе продолжительностью, определяемой длительностью вариаций радиационных условий на орбите.

К настоящему времени разработано несколько моделей, описывающих отклик полупроводниковых кремниевых микросхем на дозовые воздействия при низкой мощности дозы ионизирующего излучения. В своей основе все эти модели учитывают радиационное изменение параметров микросхем за счет образования объемных зарядов в объеме изолирующих слоев микросхем (типично это структура – термический диоксид кремния на кремнии) и поверхностных ловушек заряда на границе с кремнием. Ранее выполненные экспериментальные исследования показали [11; 12], что при комнатной температуре и выше ловушки заряда на границе раздела с кремнием, как правило, не формируются прямым взаимодействием дефектов атомной структуры с дырками, достигающими границы раздела, а вычисления на основе теории функционала плотности подтвердили, что соответствующая реакция не является энергетически выгодной [13]. Вместо этого формирование заряда в виде оборванных связей на границе раздела Si/SiO_2 определяется несколькими реакциями, которые должны произойти заранее, чтобы освободить протоны из любых содержащих водород дефектов (такие, например, как гидрогенизированная кислородная вакансия) или из молекулярного водорода, постоянно находящегося в виде примеси внедрения. Затем протоны, перемещаемые за счет дрейфа в электрическом поле или диффузии, могут взаимодействовать с пассированными водородом оборванными связями на поверхности раздела Si/SiO_2, оставляя в итоге положительно заряженную оборванную связь при поверхности раздела (DB^+_{INT}) и молекулу водорода [14]. Плотность оборванных (повисших) атомных связей на поверхности раздела с кремнием известна как плотность ловушек границы раздела N_{it}.

До недавнего времени аналитические подходы к моделированию эффекта ELDRS обычно полагались на системы уравнений, которые либо включают несколько неуправляемых подгоняемых параметров [15], либо обеспечивают только качественное описание наблюдаемых явлений вследствие упрощенного набора реакций [16], либо определяют параметры модели полуэмпирическим образом [17]. К настоящему времени разработаны аналитические модели, базирующиеся

на достаточно полной системе уравнений, которые, с одной стороны, описывают генерацию, рекомбинацию, транспорт и обмен с ловушками неравновесных носителей заряда в объеме оксида кремния с учетом его исходной и радиационно-индуцированной дефектности, а с другой стороны, описывают образование ловушек заряда на границе с кремнием в виде оборванных (свисающих) связей кремния, которое инициируется свободными протонами, достигающими границы раздела и взаимодействующими с дефектами атомной структуры границы раздела, образованными пассивацией водородом оборванных связей кремния [18]. При этом обеспечивается обоснованный выбор типов дефектов атомной структуры оксида кремния, которые создаются на основе кислородных вакансий в оксиде кремния при изготовлении микросхем и которые способны принимать участие в более чем 20-ти типах квазихимических реакций, протекающих между этими дефектами и неравновесными носителями заряда, приводя, в конечном итоге, к деградации параметров микросхем. Оценка вероятности протекания той или иной квазихимической реакции получена путем определения величины энергетических барьеров прямой и обратной реакции на основе первых принципов вычислений (т. е. на основе теории функционала плотности). Установлено, что основными источниками протонов, приводящими к зарядке границы раздела с кремнием, являются две реакции: реакция крекинга (расщепления) [19] и реакция прямого освобождения протона [20], которые протекают на основе захвата свободных дырок. Показано, что характер зависимости радиационного изменения параметров биполярных микросхем, определяемой электрическими зарядами в объеме окисла и на границе раздела с кремнием, сложным образом зависит от исходной дефектности полевого (изолирующего) оксида кремния, содержания в нем водорода (в начальной концентрации и при поступлении из подкорпусного пространства), температуры, поглощенной дозы и мощности дозы ионизирующего излучения. Оказалось, что объемный заряд в оксиде кремния при низком содержании водорода определяется дырками, захваченными в ловушки, а при высоком содержании водорода определяется водородными комплексами, содержащими захваченные протоны H^+. Показано, что рекомендуемые некоторыми руководящими документами и базовыми методиками ускоренные радиационные испытания биполярных ЭК на основе облучения при повышенной температуре не всегда обеспечивают достоверную оценку роста ловушек на границе раздела Si/SiO_2 по сравнению с испытаниями облучением при низкой мощности дозы, поскольку механизмы, ограничивающие рост ловушек в этих случаях, различны [21].

Анализ областей применения различных модельных механизмов эффекта ELDRS выполнен в работе [22], где показано, в частности, что рекомбинационный механизм ELDRS работает только в области мощности дозы более 100 рад/с.

Заключение. Описанные в настоящей работе результаты выборочных испытаний лётных партий ЭК в целом не противоречат приведенным выше выводам аналитического моделирования, подразумевающего большое разнообразие топологии микросхем и исходной дефектности диоксида кремния, связанной с особенностями технологии изготовления каждого типа ЭК. Для построения количественной модели немонотонного дозового изменения параметров необходимо детальное знание топологии и технологии изготовления данного ОУ.

Обнаруженный нами в биполярных ЭК российского производства эффект восстановления значительной доли радиационных изменений параметров в процессе отжига при комнатной и повышенной до 100 °С температуре после малодозового облучения в условиях высокой мощности дозы, при отсутствии значительного отжига повреждений после такого же облучения в условиях низкой мощности дозы, подтверждается результатами работы [23], выполненной на биполярных ЭК зарубежного производства. В этой работе утверждается, что после облучения биполярных ЭК в условиях рекомендуемой стандартами высокой мощности дозы приблизительно 50 % повреждений отжигаются при комнатной температуре. Неожиданное восстановление существенной доли радиационных изменений параметров ЭК после проведения испытаний при высокой мощности дозы требует учета в стандартах и базовых методиках испытаний на дозовые эффекты.

К настоящему времени проведены испытания на дозовые эффекты более 1000 лётных партий ЭК. Опыт испытаний лётных партий ЭК оказался положительным. Были обнаружены случаи несоответствия радиационной стойкости ЭК нормам ТУ за счет эпизодических неконтролируемых изменений в технологии производства. Наблюдаемые многочисленные, но незначительные по величине, случаи выхода параметров отдельных ЭК испытуемых выборок за нормы ТУ по дозовым эффектам, возможно, являются результатом предшествующей радиационным испытаниям электротермотренировки в специализированном испытательном центре, поскольку, как известно, повышенная температура приводит к увеличению концентрации гидрогенизированных дефектов оксида кремния на основе кислородных вакансий, являющихся источником свободных протонов.

Библиографические ссылки

1. Poivey C. Radiation Hardness Assurance for Space Systems [Электронный ресурс]. URL: http://pacs.arizona.edu/files/S021306_Reference_Document_NSREC02_SC_Poivey.pdf (дата обращения: 17.08.2015).

2. Ladbury R. Statistical Techniques for Analyzing Process or “Similarity” Data in TID Hardness Assurance // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2010. Vol. 57, No. 6. P. 3432–3437.

3. Ladbury R., Gorelick J. L. McClure S. S. Statistical Model Selection for TID Hardness Assurance // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009. Vol. 56, No. 6. P. 3354–3360.

4. Thermal-Stress Effects and Enhanced Low Dose Rate Sensitivity in Linear Bipolar ICs / M. R. Shaneyfelt [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. 2000. Vol. 47, No. 6. P. 2539–2545.

5. Effects of burn-in on radiation hardness / M. R. Shaneyfelt [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1994. Vol. 41. P. 2550–2559.

6. Harris R. D. TID Effects in Space-Like Variable Dose Rates / Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena. California JPL Publication 08-17 4/0. P. 10.

7. Analysis in the Context of Space Radiation Hardness Assurance of Low Dose Rate Results Obtained With the MIL and ESCC Test Methods / R. Marec [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2014. Vol. 61, No. 5. P. 2755–2740.

8. Максимов Ю. В., Зыков В. М. Оценка разброса стойкости электронных компонентов к дозовым эффектам от партии к партии и внутри партии на гамма-комплексе «Радиан» // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». 2014. Вып. 1. С. 69–71.

9. ГОСТ Р ИСО 16269-6–2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов.

10. Флуктуации в уровне радиационной стойкости различных партий источника опорного напряжения ОСМ Н142ЕН19 / С. А. Авдюшкин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». Вып. 3. С. 22–24.

11. Barnaby H. J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53, No. 6. P. 3103–3121.

12. Saks N. S., Brown D. B. Interface trap formation via the two-stage H+ process // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1989. Vol. 36, No. 6. P. 1848–1857.

13. Effects of hydrogen motion on interface trap formation and annealing / S. N. Rashkeev [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. Vol. 51, No. 6. P. 3158–3165.

14. Oldham T.R. Ionization Radiation Effects in MOS Oxides. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1999.

15. Mechanisms of enhanced radiation-induced degradation due to excess molecular hydrogen in bipolar oxides / X. J. Chen [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. Vol. 54, No. 6. P. 1913–1919.

16. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies / X. J. Chen [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. Vol. 56, No. 6. P. 3196–3202.

17. Hjalmarson H. P., Pease R. L., B. Devine R. A. Calculations of radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Vol. 55, No. 6. P. 3009–3015.

18. A Quantitative Model for ELDRS and H_2 Degradation Effects in Irradiated Oxides Based on First Principles Calculation / N. L. Rowsey [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. Vol. 58, No. 6. P. 2937–2944.

19. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates / S. N. Rashkeev [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2002. Vol. 49, No. 6. P. 2650–2655.

20. Defect interactions of H_2 in SiO_2: Implications for ELDRS and latent interface trap buildup / B. R. Tuttle [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. Vol. 57, No. 6. P. 3046–3053.

21. The Effects of Proton-Defect Interactions on Radiation-Induced Interface-Trap Formation and Annealing / D. R. Hughart [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. Vol. 59, No. 6. P. 3087–3092.

22. Mechanisms Separating Time-Dependent and True Dose-Rate Effects in Irradiated Bipolar Oxides / N. L. Rowsey [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2012. Vol. 59, No. 6. P. 3069–3076.

23. Dose rate effects in linear bipolar transistor / A. Johnston [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2011. Vol. 58, No. 6. P. 2816–2823.

References

1. Poivey C. Radiation Hardness Assurance for Space Systems Available at: http://pacs.arizona.edu/files/S021306_Reference_Document_NSREC02_SC_Poivey.pdf (accessed 17.08.2015).

2. Ladbury R. Statistical Techniques for Analyzing Process or “Similarity” Data in TID Hardness Assurance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, Vol. 57, No. 6, P. 3432–3437. Cited 1 times. Doi: 10.1109/TNS.2010.2086480.

3. Ladbury R., Gorelick J. L, McClure S. S. Statistical Model Selection for TID Hardness Assurance. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, Vol. 56, No. 6, P. 3354–3360. Cited 3 times. Doi: 10.1109/TNS.2009.2033691.

4. Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Witczak S. C., Fleetwood D. M., Pease R. L., Winokur P. S., Riewe L. C., Hash G. L. Thermal-Stress Effects and Enhanced Low Dose Rate Sensitivity in Linear Bipolar ICs. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2000, Vol. 47, No. 6, P. 2539–2545. Cited 46 times. doi: 10.1109/23.903805.

5. Shaneyfelt M. R., Fleetwood D. M., Schwank J. R., Meisenheimer T. L., Winokur P. S. Effects of burn-in on radiation hardness. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, Vol. 41, P. 2550–2559. Cited 41 times. Doi: 10.1109/23.340615.

6. Harris R. D. TID Effects in Space-Like Variable Dose Rates. *Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California JPL Publication,* 2008, P. 10.

7. Marec R., Carlotti J. F., Marin M., Calvel P., Barillot C., Mancini R., Sarno M., Mélotte M. and Cueto J. Analysis in the Context of Space Radiation Hardness Assurance of Low Dose Rate Results Obtained With the MIL and ESCC Test Methods. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2014, Vol. 61, No. 5, P. 2755–2740. Cited 0 times. Doi: 10.1109/TNS.2014.2352856.

8. Maksimov Yu. V., Zykov V. M. [Evaluation of dispersion stability of electronic components to the dose effect from batch to batch and within the party on the gamma complex “Radian”]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu*. 2014, No. 1, P. 69–71 (In Russ.).

9. GOST R ISO 16269-6-2005. *Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie dannykh. Opredelenie statisticheskikh tolerantnykh intervalov* [State Standard R ISO 16269-6-2005. Statistical methods. Statistical data

presentation. Determination of statistical tolerance intervals]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 28 p.

10. Avdyushkin S. A., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Kochura S. G., Kondyan S. S., Patskov A. V. [Fluctuations in the level of radiation resistance of various parties voltage reference OSM N142EN19]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnuyu apparaturu*. 2015, No. 3, P. 22–24 (In Russ.).

11. Barnaby H. J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, Vol. 53, No. 6, P. 3103–3121. Cited 110 times. Doi: 10.1109/TNS.2006.885952.

12. Saks N. S., Brown D. B. Interface trap formation via the two-stage H+ process. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 1989, Vol. 36, No. 6, P. 1848–1857. Cited 64 times. Doi: 10.1109/23.45378.

13. Rashkeev S. N., Fleetwood D. M., Schrimpf R. D., Pantelides S. T. Effects of hydrogen motion on interface trap formation and annealing. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, Vol. 51, No. 6, P. 3158–3165. Cited 39 times. Doi: 10.1109/TNS.2004.839202.

14. Oldham T. R. *Ionizatsionnye radiatsionnye effekty v MOP okside.* [Ionization Radiation Effects in MOS Oxides]. 1999, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, P. 188.

15. Chen X. J., Barnaby H. J., Vermeire B., Holbert K., Wright D., Pease R. L., Dunham G., Platteter D. G., Seiler J., McClure S., Adell P. Mechanisms of enhanced radiation-induced degradation due to excess molecular hydrogen in bipolar oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2007, Vol. 54, No. 6, P. 1913–1919. Cited 35 times. Doi: 10.1109/TNS.2007.909708.

16. Chen X. J., Barnaby H. J., Adell P., Pease R. L., Vermeire B., Holbert K. E. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2009, Vol. 56, No. 6, P. 3196–3202. Cited 8 times. Doi: 10.1109/TNS.2009.2034154.

17. Hjalmarson H.P., Pease R. L., B. Devine R. A. Calculations of radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2008, Vol. 55, No. 6, P. 3009–3015. Cited 21 times. Doi: 10.1109/TNS.2008.2007487.

18. Rowsey N. L., Mark E. L, Ronald D. S., Daniel M. F., Blair R. T., Sokrates T. P. A Quantitative Model for ELDRS and H_2 Degradation Effects in Irradiated Oxides Based on First Principles Calculations. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2011, Vol. 58, No. 6, P. 2937–2944. Cited 7 times. Doi: 10.1109/TNS.2011.2169458.

19. Rashkeev S. N., Cirba C. R., Fleetwood D. M., Schrimpf R. D., Witczak S. C., Michez A., Pantelides S. T. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2002, Vol. 49, No. 6, P. 2650–2655. Cited 71 times. Doi: 10.1109/TNS.2002.805387.

20. Tuttle B. R., Hughart D. R., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Pantelides S. T. Defect interactions of H_2 in SiO_2: Implications for ELDRS and latent interface trap buildup. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2010, Vol. 57, No. 6, P. 3046–3053. Cited 5 times. Doi: 10.1109/TNS.2010.2086076.

21. Hughart D. R., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Rowsey N. L., Law M. E., Tuttle B. R., Pantelides S. T. The Effects of Proton-Defect Interactions on Radiation-Induced Interface-Trap Formation and Annealing. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2012, Vol. 59, No. 6, P. 3087–3092. Cited 4 times. Doi: 10.1109/TNS.2012.2220982.

22. Rowsey N. L., Law M. E., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Tuttle B. R., Pantelides S. T. Mechanisms Separating Time-Dependent and True Dose-Rate Effects in Irradiated Bipolar Oxides. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2012, Vol. 59, No. 6, P. 3069–3076. Cited 5 times. Doi: 10.1109/TNS.2012.2222669.

23. Johnston A., Swimm R., Harris R. D., Thorbourn D. Dose rate effects in linear bipolar transistor. *IEEE Transactions on Nuclear Science,* 2011, Vol. 58, No. 6, P. 2816–2823. Cited 4 times. Doi: 10.1109/TNS.2011.2168979.

© Зыков В. М., Максимов Ю. В., Максимов И. А., Кочура С. Г., Иванов В. В., Пацков А. В., 2015

УДК 621.396: 629.783

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 891–897

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

И. Н. Карцан[1], А. С. Тимохович[1*], Т. И. Карцан[1], Д. Д. Дмитриев[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: TAStepanich@yandex.ru

Рассмотрена разработка метода повышения помехоустойчивости аппаратуры потребителей посредством комплексирования глобальных навигационных спутниковых систем-приемников и инерциальных датчиков.

К недостаткам спутниковых радионавигационных систем можно отнести невысокую надежность угловых измерений, достаточно длительное время разрешения фазовой неоднозначности, недостаточную длину базовых линий интерферометра, которые непосредственно влияют на погрешность измерений пространственной ориентации.

Предложен метод комплексирования данных датчиков с угломерной аппаратурой спутниковых радионавигационных систем, который дает возможность повысить эффективность использования угломерной аппаратуры потребителей за счет того, что эти системы определяют одни и те же параметры пространственного положения объекта. Кроме того, данный метод позволяет сузить полосы пропускания следящих систем спутниковых радионавигационных систем до минимума, обеспечивая точность и помехоустойчивость, близкие к потенциальным.

В интегрированных инерциально-спутниковых навигационных системах комплексирование позволяет устранить инструментальные погрешности, такие как дрейф гироскопических датчиков, до минимума сокращает время начальной выставки.

Наиболее целесообразно использование тесно связанных интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем с интеграцией по выходным параметрам. Такие системы по параметрам близки к оптимальным и не требуют кардинальной переработки аппаратурных средств. В свою очередь, тесно связанная система требует доработки аппаратурных и программных средств как у инерциальных навигационных систем, так и у спутниковых радионавигационных систем на всех уровнях. Если такая доработка невозможна, например, при использовании импортной аппаратуры, то комплексирование обеспечивается только вторичной обработкой или на уровне выходных данных. В первом случае это слабосвязанная система, а во втором – разомкнутая система.

Ключевые слова: комплексирование, фазовый сдвиг, навигационная аппаратура.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 891–897

DETERMINING NAVIGATION PARAMETERS OF OBJECTS UNDER THE ACTION OF INTERFERENCE OF VARIOUS ORIGINS

I. N. Kartsan[1], A. S. Timokhovitch[1*], T. I. Kartsan[1], D. D. Dmitriev[2]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[*]E-mail: TAStepanich@yandex.ru

The article describes the development of methods for improving the noise immunity of user's equipment through the integration of global navigation satellite systems receivers and inertial sensors.

The disadvantages of satellite navigation systems include the low reliability of angular measurements, quite a long time carrier-phase ambiguity resolution, insufficient baseline length of the interferometer which directly affect the measurement uncertainty of spatial orientation. The method of integration of sensor data with goniometric equipment of satellite navigation systems, which allows to increase the efficiency of using goniometric equipment consumer due to

the fact that these systems define the parameters of the spatial position of the object. In addition, this method allows you to narrow bandwidth tracking systems satellite navigation systems to a minimum, ensuring the accuracy and noise immunity of the close to potential. In integrated inertial-satellite navigation systems, the aggregation allow to eliminate instrumental errors, such as drift of the gyro sensors, reduces to a minimum the time of initial exhibition. The use of closely related integrated inertial-satellite navigation systems with integration on output parameters is the most appropriate as this system parameters close to optimal and do not require substantial processing of the hardware resources. In turn, closely related system requires further development of hardware and software, like inertial navigation systems and satellite navigation systems at all levels. If such completion is impossible, for example, using imported equipment, the aggregation provides only secondary treatment or at the level of the output data. In the first case it is a loosely coupled system, and the second case is an open system.

Keywords: aggregation, phase shift, navigation equipment.

Введение. В последние годы все больше внимания уделяется вопросам прецизионного (высокоточного) навигационного обеспечения, включая угловую ориентацию объектов, в сложной электромагнитной обстановке, т. е. помехозащищенной аппаратуры.

В современной технике используются различные навигационные системы – инерциальные, спутниковые, баровысотомеры, радиолокационные, системы локальной радионавигации и пр. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Поскольку многие задачи, решаемые этими системами, совпадают, то имеет смысл объединить их в единую навигационную систему. Такая интеграция позволит использовать достоинства каждой из систем и компенсировать недостатки, присущие отдельным системам, за счет преимуществ других.

В настоящее время интенсивно развивается направление, основанное на интеграции инерциальных и спутниковых радионавигационных систем.

В качестве системы высокоточного позиционирования и определения ориентации подвижных объектов возможно использование многоканальных приемников сигналов ГНСС ГЛОНАСС нового поколения, способных измерять пространственную ориентацию объекта интерферометрическими методами, что собой представляет комплексирование.

Квазиоптимальные интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы. Комплексирование – совместное применение различных по виду и способу формирования физических полей для выработки с помощью разнородных датчиков новой по качеству навигационной информации.

Комплексирование может обеспечить:

– повышение точностных характеристик комплексированной аппаратуры по сравнению с точностными характеристиками ее состовляющих;

– повышение помехоустойчивости и надежности работы комплексируемой аппаратуры;

– непрерывность определения координат при нарушениях однородности или непрерывности навигационных полей;

– улучшение динамических характеристик измерителей;

– сокращение времени выхода аппаратуры в рабочий режим.

Рассмотрим комплексирование на примере использования тесно связанной интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы (ИИСНС) с интеграцией по выходным параметрам. Такие системы по параметрам близки к оптимальным и не требуют кардинальной переработки аппаратных средств.

Комплексирование на уровне выходных данных имеет следующие преимущества:

– минимальное число параметров в интерфейсе обмена данными;

– минимально возможная скорость обмена, определяемая динамикой объекта;

– возможность разделения функций между инерциальными навигационными системами (ИНС) и спутниковыми радионавигационными системами (СРНС), использование традиционных алгоритмов первичной обработки; имеется возможность поэтапного комплексирования, например, одностороннего комплексирования (использование данных СРНС в ИНС или, наоборот, использование датчиков ИНС в СРНС); при этом степень интеграции может быть на уровне первичной обработки;

– минимальная доработка аппаратуры, возможность использования различных типов ИНС и СРНС.

Для повышения помехоустойчивости необходимо комплексировать навигационную аппаратуру потребителя (НАП) и ИНС на уровне первичной обработки, поскольку именно там производится слежение за сигналами навигационных систем, и узлы этого уровня более всего подвержены воздействию помех. Комплексирование целесообразно проводить на уровне низкочастотных устройств, в противном случае чрезмерно возрастает объем передаваемых данных и увеличиваются вычислительные затраты.

Наиболее целесообразно использовать данные ИНС в фильтрах схемы слежения за задержкой и несущей по схеме, как показано на рис. 1.

В автономном режиме схема слежения за несущей содержит коррелятор, в котором производится свертка псевдослучайной последовательности, интегратор и дополнительный фильтр Калмана. Время накопления сигнала в интеграторе может быть в пределах от 1 до 10 мс. Увеличение времени накопления больше 10 мс встречает затруднения из-за наличия в сигнале цифровой информации.

Отношение сигнал/шум на выходе коррелятора определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{B}{P_c / N_0}, \qquad (1)$$

где B – полоса частот интегратора; P_c – мощность сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности шума.

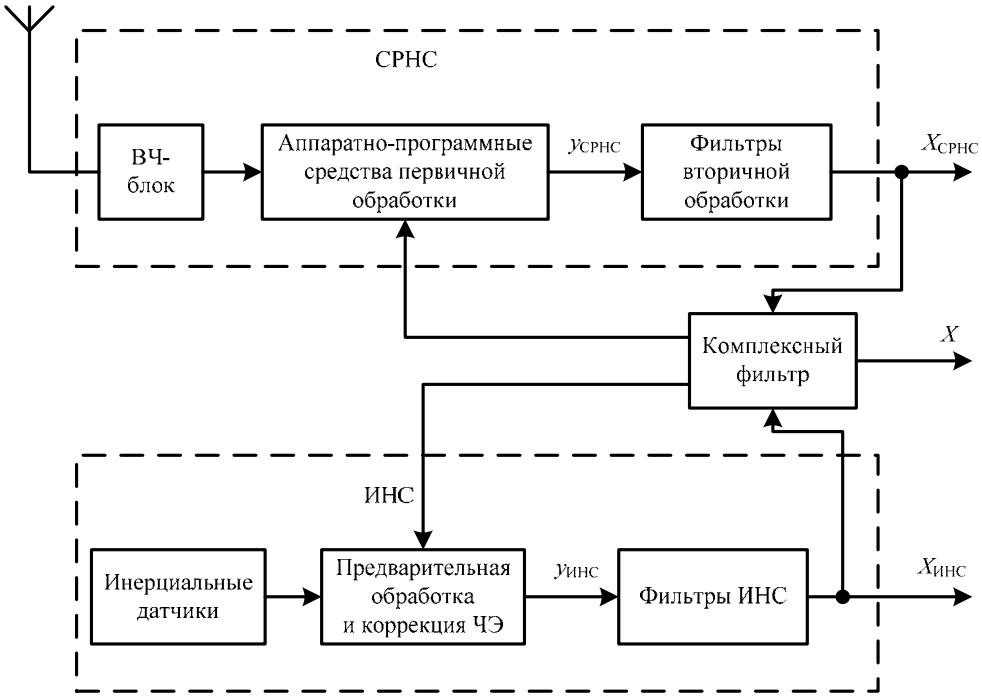


Рис. 1. Структура квазиоптимальной системы с комплексированием по выходам

При B = 100 Гц, P_c/N_0 = 40 дБ/Гц отношение сигнал/шум на выходе интегратора составляет 20 дБ.

Дополнительный фильтр Калмана имеет эффективную полосу, определяемую динамикой объекта. Для неподвижного объекта полоса фильтра может составлять 5–10 Гц, для динамических объектов – 50–100 Гц.

Дополнительная фильтрация для неподвижного объекта сужает полосу пропускания следящей системы в 10 раз, что дает повышение отношения сигнал/шум на выходе следящей системы 10 дБ. При комплексировании с ИНС в НАП поступает информация о динамике объекта, которую можно использовать в схеме слежения за задержкой. За счет учета динамики возможно сужение эффективной полосы фильтров до уровня 1 Гц как для неподвижных, так и для динамичных объектов. При эффективной полосе фильтров 1 Гц отношение сигнал/шум увеличивается на 20 дБ. Аналогично повышается отношение сигнал/шум и в канале слежения за несущей.

В аппаратуре типа МРК в фильтрах слежения за задержкой используется информация о приращении фазы несущей частоты сигнала навигационного космического аппарата, т. е. информация о динамике принимаемого сигнала в фильтры схемы слежения за задержкой поступает из схемы слежения за несущей. В результате эффективная полоса схемы слежения за несущей сужается до долей герц, за счет чего значительно уменьшается случайная составляющая погрешности измерения псевдодальности. Однако при этом полоса фильтров схемы слежения за несущей остается прежней, при воздействии помех сверх некоторого уровня происходит срыв как в канале слежения за несущей, так и в канале слежения за задержкой, т. е. помехоустойчивость не улучшается [1–4].

Комплексирование инерциальной и спутниковой радионавигационной аппаратуры при измерении пространственной ориентации. При комплексировании с ИНС информацию о динамике объекта следует использовать в схеме слежения за несущей, а оттуда данные о динамике объекта поступают в схему слежения за дальномерным кодом.

Достоверность и надежность работы угломерной аппаратуры можно существенно повысить за счет комплексирования СРНС с инерциальной – гироскопами и акселерометрами. Наиболее «тонкое» место алгоритмов определения угловой ориентации – это разрешение фазовой неоднозначности. Именно при разрешении фазовой неоднозначности возможны грубые ошибки. Для обеспечения достоверности и надежности переборных алгоритмов можно сузить диапазон поиска целых циклов, но для этого требуются априорные сведения об угловой ориентации объекта.

Получить априорные сведения об угловой ориентации объекта можно несколькими способами. Одним из таких способов является применение динамических алгоритмов, однако они требуют некоторого времени, и при сбоях работоспособность восстанавливается только через несколько минут. Другой способ – комплексирование угломерной аппаратуры с гироскопическими датчиками. В этом случае в процессе работы априорные данные можно получить

с гироскопа, за исключением начального периода после включения. После включения питания гироскоп требует начальной установки, поэтому в начальный период времени априорных данных с гироскопа на угломерную аппаратуру не поступает, и проблема разрешения фазовой неоднозначности остается.

Для получения априорных данных об угловом положении объекта можно использовать систему акселерометрических датчиков. Обычно система из трех ортогонально расположенных акселерометров входит в состав БИНС и применяется для определения текущего положения и вектора скорости объекта. Если использование БИНС по каким-либо причинам (габариты, стоимость и др.) затруднено, то для данных целей можно применять твердотельные акселерометры, имеющие малые габариты и стоимость [5; 6].

Акселерометрический датчик состоит из трех акселерометров, расположенных вдоль трех взаимно ортогональных осей левосторонней системы координат (рис. 2). Обычно на объекте датчик устанавливают таким образом, чтобы акселерометры располагались вдоль осей объекта. С помощью датчика измеряется вектор ускорения объекта, а затем с помощью интегрирования вычисляется вектор скорости и текущие координаты объекта.

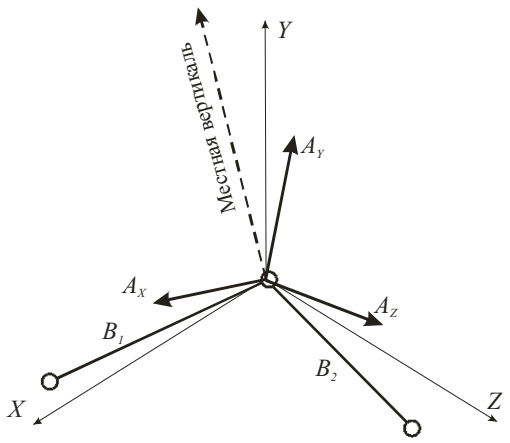


Рис. 2. Определение местной вертикали с помощью акселерометров

Поскольку скорость объекта не может неограниченно возрастать, то среднее ускорение объекта за достаточно длительный период времени близко к нулю. Усредняя показания датчиков, можно найти вектор силы тяжести в местной связанной с объектом системе координат и тем самым определить один из параметров ориентации объекта [7; 8].

Таким образом, по показаниям акселерометров можно установить направление вертикали в связанной системе координат.

При больших ошибках измерения местной вертикали определение угловой ориентации по одному навигационному спутнику (НС) может иметь также большую погрешность, при которой проверка решения по всему созвездию НС и уточнение угловой ориентации становятся невозможными. Такая ситуация может иметь место, например, при наличии априорных сведений о том, что объект расположен в горизонтальной плоскости с некоторым допуском по данному параметру. В этом случае ставится задача максимально использовать априорные данные для сужения диапазона поиска неоднозначности по двум (трем) НС для получения начального набора возможных решений [9].

Координаты местной вертикали задаются в связанной системе координат. По известной конфигурации антенной системы можно вычислить угол между вектором-базой и местной вертикалью и вертикальную составляющую координат вектора-базы (рис. 2). Область возможных положений вектора-базы представляет собой окружность с постоянной высотой над горизонтальной плоскостью (рис. 3). Радиус окружности равен проекции вектора-базы на горизонтальную плоскость. Поиск фазовой неоднозначности сводится к перебору всех возможных положений вектора-базы на данной окружности. Поскольку область возможных положений вектора-базы имеет одну степень свободы по углу курса, то число переборов должно быть пропорционально длине базы. Это снимает все ограничения переборного алгоритма на длину базы [10; 11].

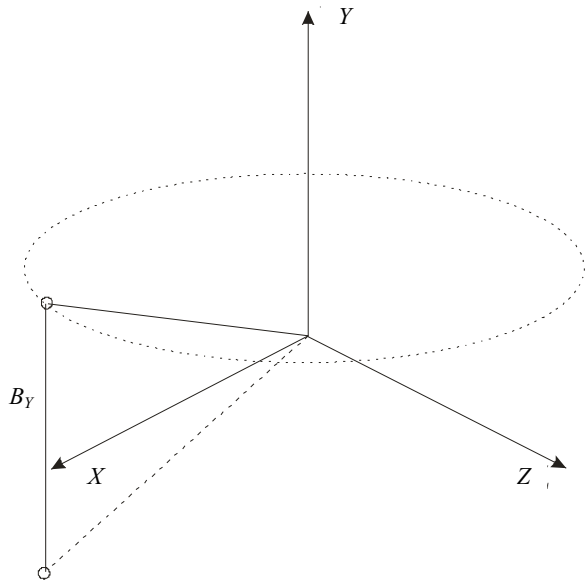


Рис. 3. Область возможных положений вектора-базы

Для исследования переборного алгоритма по двум (трем) НС необходимо построить линию сигналов в пространстве фазовых сдвигов. Линия сигналов в этом пространстве, по-видимому, будет представлять собой эллипс. При заданном значении фазовой неоднозначности по одному НС фазовый сдвиг другого НС может принимать только два значения; в этих точках вычисляется угловая ориентация вектора-базы и выполняется проверка и уточнение угловой ориентации по всему созвездию НС.

Фазовый сдвиг сигнала НС описывается выражением

$$\varphi = k_x x + k_y y + k_z z. \quad (2)$$

В ТЦСК известна вертикальная координата вектора-базы, поэтому выражение (2) можно переписать в виде

$$\varphi - k_y y = \varphi_{\text{ă}} = k_x x + k_z z. \quad (3)$$

Пронормируем направляющие косинусы направлений на НС в горизонтальной плоскости так, чтобы длина горизонтальной проекции равнялась 1:

$$\frac{\varphi - k_y y}{\sqrt{1-k_y^2}} = \varphi_{\text{ä}} = \frac{k_x}{\sqrt{1-k_y^2}} x + \frac{k_z}{\sqrt{1-k_y^2}} z \qquad (4)$$

или

$$\varphi_{\text{ä}} = k_{x\text{ä}} x + k_{z\text{ä}} z. \qquad (5)$$

Выражение (5) – это уравнение интерферометра, лежащего в горизонтальной плоскости, причем источник излучения также лежит в горизонтальной плоскости. Аналогичное уравнение можно записать и для второго НС. Линия возможного положения вектора-базы представляет собой окружность с радиусом, равным длине проекции вектора-базы на горизонтальную плоскость:

$$B_{\text{ä}} = \sqrt{x^2 + z^2}. \qquad (6)$$

Линия возможного положения вектора-базы инвариантна относительно поворотов, поэтому можно выбрать систему координат *X0Z* так, чтобы направления на НС в горизонтальной плоскости были симметричны оси *X* (рис. 4).

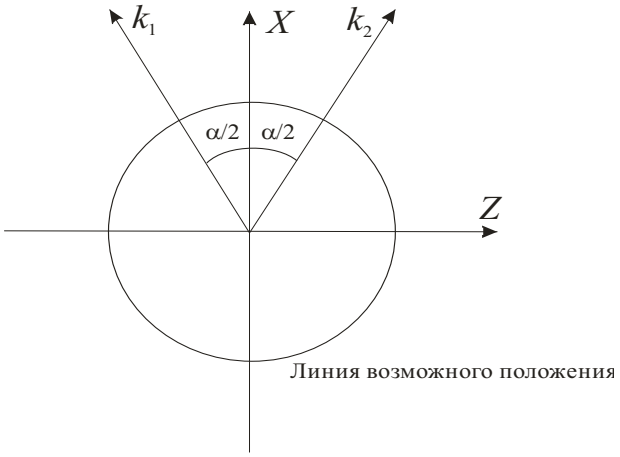


Рис. 4. Построение линии сигналов

Для построения линии сигналов необходимо спроецировать точки линии возможных положений на оси k_1 и k_2 и выразить k_1 через k_2. Проекции линии возможных положений на оси k_1 и k_2 функционально связаны с фазовыми сдвигами сигналов 1-го и 2-го НС выражениями (2)–(4).

Векторы-направления на НС:

$$k_1 = \cos\alpha/2 \cdot x + \sin\alpha/2 \cdot z, \qquad (7)$$
$$k_2 = \cos\alpha/2 \cdot x - \sin\alpha/2 \cdot z,$$

где α – угол между векторами.

Уравнение линии возможного положения можно записать в виде

$$x^2 + z^2 = B^2. \qquad (8)$$

Выразим из уравнения (7) k_1 и k_2 через x и z:

$$x = (k_1 + k_2)/\cos\alpha/2, \qquad (9)$$
$$z = (k_1 - k_2)/\sin\alpha/2.$$

Подставив уравнение (8) в (9), получим

$$\frac{(k_1 + k_2)^2}{\cos^2\alpha/2} + \frac{(k_1 - k_2)^2}{\sin^2\alpha/2} = \hat{A}^2. \qquad (10)$$

Линия возможного положения в системе координат (k_1, k_2) представляет собой линию сигналов. Координаты (k_1, k_2) точки на линии сигналов – это фазовые сдвиги $\varphi_{\text{г}}$, поскольку они представляют проекции вектора-базы на вектор-направление НС (рис. 5).

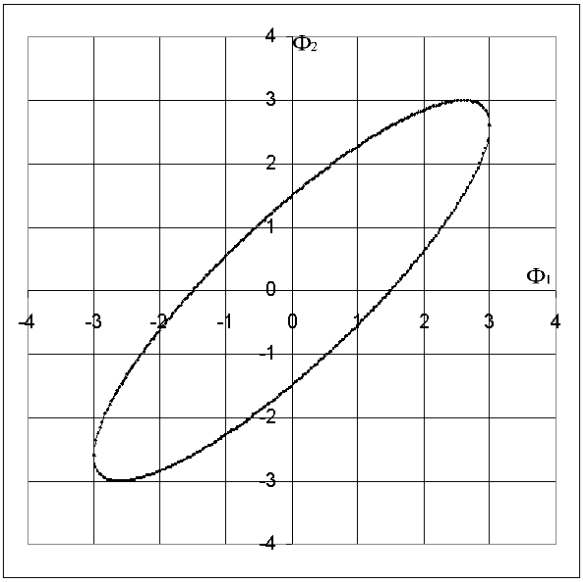


Рис. 5. Линия сигналов

Линия сигналов представляет собой эллипс, оси которого проходят по углом 45°, а длина осей

$$D = B \cdot \sqrt{1 \mp \cos\alpha}. \qquad (11)$$

Уравнение (10) можно переписать в виде

$$\begin{aligned}&(k_1 - k_2)^2 \cos^2\alpha/2 + (k_1 + k_2)^2 \sin^2\alpha/2 = \\ &= k_1^2 - 2\,k_1\,k_2\left(\cos^2\alpha/2 - \sin^2\alpha/2\right) + k_2^2 = \\ &= k_1^2 - 2k_1\,k_2\cos^2\alpha + k_2^2 = B^2\sin^2\alpha.\end{aligned} \qquad (12)$$

Линия сигналов в пространстве k_1, k_2 приведена на рис. 5.

Выразим k_1 из уравнения (12) через k_2:

$$k_1 = k_2\cos\alpha \pm \sin\alpha \cdot \sqrt{B^2 - k_2^2}. \qquad (13)$$

Для построения линии сигналов в пространстве фазовых сдвигов НС следует выполнить обратные преобразования:

$$k_{1,2\text{ä}} = \frac{k_{1,2}}{\sqrt{1 - k_{1,2y}^2}}. \qquad (14)$$

Отсюда

$$k_{1,2\text{ä}} = \frac{k_{1,2}}{\sqrt{1 - k_{1,2y}^2}}. \qquad (15)$$

Далее

$$\varphi = k + k_y y,$$

$$\varphi_{1,2} = k_{1,2\text{ä}}\sqrt{1-k_{1,2y}^2} + k_{1,2y}y,$$

$$k_{1,2\text{ä}} = \frac{\varphi_{1,2} - k_{1,2y}y}{\sqrt{1-k_{1,2y}^2}}. \qquad (16)$$

Линию сигналов в пространстве (φ_1, φ_2) получим, подставив выражение (16) в (12):

$$\frac{\varphi_1 - k_1 y}{\sqrt{1-k_{1y}^2}} = \frac{\varphi_2 - k_{2y}y}{\sqrt{1-k_{2y}^2}}\cos\alpha \pm \sin\alpha \cdot \sqrt{B^2 - \left(\frac{\varphi_2 - k_{2y}y}{\sqrt{1-k_{2y}^2}}\right)^2},$$

$$\varphi_1 = \left(\left(\varphi_2 - k_{2y}y\right)\cos\alpha \pm \right.$$

$$\left. \pm \sin\alpha \cdot \sqrt{B^2\left(1-k_{2y}^2\right) - \left(\varphi_2 - k_{2y}y\right)^2}\right)\frac{\sqrt{1-k_{1y}^2}}{\sqrt{1-k_{2y}^2}} + k_1 y. \qquad (17)$$

Если местная вертикаль задана с погрешностью $\Delta\delta$, то угол между вектором-базой также задается с погрешностью, что приводит к погрешности априорных сведений о вертикальной составляющей вектора-базы, при этом линия сигналов смещается. На рис. 6 приведены три линии сигналов, соответствующих углам тангажа 0°, 5° и –5° (область поиска решения заштрихована). При изменении угла тангажа линия сигналов смещается вдоль диагонали, при этом изменяются размеры эллипса [12–15].

Так, если направление вертикали задано с погрешностью, то угол тангажа также будет задан с погрешностью; при этом область перебора будет находиться между двумя линиями сигналов, соответствующих двум крайним случаям.

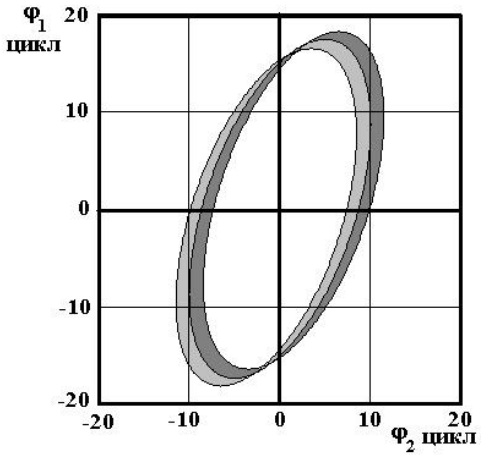


Рис. 6. Область поиска решения при неточном задании местной вертикали

Так, если направление вертикали задано с погрешностью, то угол тангажа также будет задан с погрешностью; при этом область перебора будет находиться между двумя линиями сигналов, соответствующих двум крайним случаям.

Заключение. Обобщая изложенное выше, отметим следующее:

1. Комплексирование данных инерциальных датчиков с угломерной аппаратурой СРНС позволяет значительно повысить надежность угловых измерений, сократить время разрешения фазовой неоднозначности, увеличить длину базовых линий интерферометра, что, в свою очередь, позволяет уменьшить погрешность измерений пространственной ориентации.

2. Комплексирование ИНС и СРНС наиболее эффективно при использовании угломерной аппаратуры потребителей, так как эти системы определяют одни и те же параметры пространственного положения объекта и поэтому устраняют недостатки друг друга на уровне первичных параметров.

3. Полученные в согласованном фильтре параметры движения объекта используются как в фильтрах ИНС, так и в фильтрах первичной обработки сигналов СРНС, что позволяет сузить полосы пропускания следящих систем СРНС до минимума, обеспечивая точность и помехоустойчивость, близкие к потенциальным. В ИИСНС комплексирование позволяет устранить инструментальные погрешности, например дрейф гироскопических датчиков, до минимума сокращает время начальной выставки.

4. Наиболее целесообразно использование тесно связанной ИИСНС с интеграцией по выходным параметрам – такие системы по параметрам близки к оптимальным и не требуют кардинальной переработки аппаратурных средств.

5. Тесно связанная система требует доработки аппаратурных и программных средств как ИНС, так и СРНС на всех уровнях. Если такая доработка невозможна, например при использовании импортной аппаратуры, то комплексирование обеспечивается только вторичной обработкой или на уровне выходных данных. В первом случае это слабосвязанная система, а во втором – разомкнутая система.

Благодарности. Работа выполнена при ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение № 14.574.21.0131).

Acknowledgments. This work was performed under the Federal target program “Research and development on priority directions of development of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020” (agreement No 14.574.21.0131).

Библиографические ссылки

1. Карцан И. Н., Жукова Е. С., Карцан Р. В. Баллистическое и временное обеспечение космических аппаратов на различных орбитах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. Т. 2, № 2 (26). С. 19–24.

2. Карцан И. Н. Метод исключения ошибок определения местоположения при одновременном использовании навигационных систем // Вестник СибГАУ. 2008. № 3 (20). С. 101–103.

3. Повышение точности определения геодезического пункта с использованием радионавигационной системы / И. Н. Карцан [и др.] // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 68–73.

4. Онучин О. Н., Емельянцев Г. И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общ. ред. чл.-кор. РАН В. Г. Пешехонова. СПб. : Электроприбор, 1999. 357 с.

5. Интегрированная инерциальная спутниковая система ориентации и навигации с разнесенными приемными антеннами / Л. П. Несенюк [и др.] // Гироскопия и навигация. 2000. № 4 (31). С. 41–49.

6. Ефименко В. С., Харисов В. Н. Адаптивная пространственно-временная фильтрация при многоканальном приеме // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32, № 9. С. 1893–1901.

7. Вороховский Я., Ильичев В. Высокостабильные малошумящие кварцевые генераторы // Компоненты и технологии. 2005. № 8. С. 14–19.

8. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М. : Радио и связь, 2004. 608 с.

9. Харисов В. Н. Нелинейная фильтрация при многомодальном апостериорном распределении // Техническая кибернетика. 1985. № 6. С. 147–155.

10. Эффективность радионавигационных систем / И. Н. Карцан [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 48–50.

11. Зайцев Г. Ф., Степанов В. К. Квазиоптимальные следящие системы. Киев : Высш. шк., 1984. 176 с.

12. Пешехонов В. Г. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации : сб. ст. и докл. СПб. : Электроприбор, 2001. 235 с.

13. Sukkarieh S. Low Cost, High Integrity Aided Inertial Navigation Systems For Autonomous Land Vehicles : Ph. D. Thesis Univ. of Sydney. 2000. 136 p.

14. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации. М. : МГУ, 2010. 126 с.

15. Weston J. L. Basic Principles of Strapdown Inertial Navigation Systems. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. // Radar, sonar, navigation and avionics. 2004. Ch. 3. P. 17–59.

References

1. Kartsan I. N., Zhukova E. S., Kartsan R. V. [Ballistic and temporary provision of satellites in different orbits]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, [Reports of Tomsk state University of control systems and Radioelectronics]. 2012, Vol. 2, No. 2(26), P. 19–24 (In Russ.).

2. Kartsan I. N. [The elimination method of position errors when using navigation systems]. *Vestnik SibGAU.* 2008, No. 3 (20), P. 101–103 (In Russ.).

3. Kartsan I. N., Anpilogov V. N., Litoshik S. V., Zhukova E. S. [Improving the accuracy of geodetic points using the radio navigation system]. *Vestnik SibGAU.* 2011, No. 7 (40), P. 68–73 (In Russ.).

4. Onuchin O. N. *Integrirovannye sistemy orientatsii i navigatsii dlya morskikh podvizhnykh objektov* [Integrated system of orientation and navigation of sea mobile objects]. St. Petersburg, Elektropribor Publ., 1999, 357 p.

5. Nesenyuk L. P., Fateev Yu. L., Barinov S. P. [Integrated inertial satellite system of orientation and navigation with spaced receiving antennae]. *Giroskopiya i navigatsiya.* 2000, No. 4 (31), P. 41–49 (In Russ.).

6. Efimenko V. S., Xarisov V. N. [Adaptive spatio-temporal filtering for multichannel reception]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1987, Vol. 32, No. 9, P. 1893–1901 (In Russ.).

7. Vorokhovskiy Ya., Il'ichev V. [Highly stable low-noise quartz oscillators]. *Komponenty i tekhnologii*. 2005, No. 8, P. 14–19 (In Russ.).

8. Tixonov V. I., Xarisov V. N. *Statisticheskiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem.* [Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004, 608 p. (In Russ.).

9. Kharisov V. N. [Nonlinear filtering with multimodal posterior distribution]. *Tekhnicheskaya kibernetika*, 1985, No. 6, P. 147–155 (In Russ.).

10. Kartsan I. N., Okhotkin K. G. [The effectiveness of navigation systems]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3(49), P. 48–50 (In Russ.).

11. Zaytsev G. F., Stepanov V. K. *Kvazioptimal'nye sledyashchie sistemy.* [Quasi-optimal servo system]. Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1984.176 p. (In Russ).

12. Peshehonov V. G. *Integrirovannye inertsial'no-sputnikovye sistemy navigatsii* [Integrated inertial-satellite navigation system]. St. Petersburg, Elektropribor, 2001, 235 p. (In Russ.).

13. Sukkarieh S. Low Cost, High Integrity Aided Inertial Navigation Systems For Autonomous Land Vehicles. Ph.D. Thesis, Univ. of Sydney, 2000, 136 p.

14. Golovan A. A., Parusnikov N. A. *Matematicheskie osnovy navigatsionnykh sistem. Ch. I. Matematicheskie modeli inertsial'noy navigatsii.* [Mathematical foundations of navigation systems. Part I. Mathematical model of inertial navigation]. Moscow, MGU Publ., 2010, 126 p.

15. Weston J. L. Basic Principles Of Strapdown Inertial Navigation Systems. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd Edition. *Radar, sonar, navigation and avionics*, 2004, Part 3, P. 17–59.

© Карцан И. Н., Тимохович А. С.,
Карцан И. Н., Дмитриев Д. Д., 2015

УДК 681.516.75

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 898–906

ВЛИЯНИЕ ДЕСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА РАДИООТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ РЕФЛЕКТОРОВ АНТЕНН ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Е. Михеев[1], А. В. Гирн[1], Д. В. Раводина[1], И. И. Хоменко[1], Р. В. Алякрецкий[2*]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
[*]E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Рассмотрено влияние деструктивных факторов окружающей среды, таких как влажность, перепад температур, ультрафиолетовое излучение, на адгезионную прочность, микроструктуру и радиоотражающие свойства покрытий на рефлекторах антенн из полимерных композиционных материалов (ПКМ). В качестве образцов использовались углепластики и стеклопластики различных схем армирования. Радиоотражающие покрытия представляют собой многослойную композицию, нанесенную методом вакуумной металлизации магнетронным способом. Для нанесения покрытий была разработана схема компоновки вакуумной камеры, позволяющая наносить многослойные покрытия на изделия большой площади за одну загрузку камеры, что позволяет повысить качество и производительность процесса нанесения покрытия. Для проведения исследований было проведено напыление одно- и двухслойных покрытий на образцы из углепластика и стеклопластика. После нанесения покрытий были проведены испытания полученных образцов в климатической камере. Проведены исследования адгезионной прочности нанесенных покрытий до и после климатических испытаний, которые показали, что двухслойные покрытия имеют большую прочность сцепления, чем однослойные. У однослойных покрытий адгезия составляет 1–2 балла, у двухслойных – 0–1 балл по ISO 2490. Заметного влияния деструктивных факторов на адгезионную прочность не выявлено. Исследования морфологии и элементный анализ покрытий показали, что покрытие распределено равномерно по поверхности и заметных изменений после испытаний в климатической камере не обнаружено. Таким образом, можно сделать вывод о том, что покрытия, нанесенные по предложенной технологии, являются стойкими к действию окружающей среды и могут быть использованы в качестве радиоотражающих покрытий наземных рефлекторов антенн.

Ключевые слова: вакуумное напыление, многослойное покрытие, рефлекторы антенн, полимерные композиционные материалы.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 898–906

DESTRUCTIVE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE PROPERTIES OF RADIO REFLECTIVE COATING FOR ANTENNA REFLECTORS FROM THE POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

A. E. Miheev[1], A. V. Girn[1], D. V. Ravodina[1], I. I. Khomenko[1], R. V. Alyakretskiy[2*]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2] JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
[*]E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

In this case study the influence of destructive environmental factors such as humidity, temperature and UV radiation on the adhesive strength, microstructure and properties of coatings of radio-reflectivity antenna reflectors made of polymeric composite materials (PCM) has been analyzed. For the test samples we used carbon and fiberglass units with various reinforcement schemes.

Radio-reflective coated surfaces are multi-layer composition, which has been applied by vacuum metallization method via magnetron usage. For the coating we’ve designed the layout drawing for the vacuum chamber, which enables a multi-layer coating process to be applied to large surface area of a product per load. This helps to improve the quality and performance of the coating process.

Sputtering of one- and two-layer coatings on samples of carbon fiber and fiberglass has been made for the research purposes. When the coating process was completed, the samples were tested in climatic chamber.

Studies of adhesion strength of coated samples before and after environmental tests have shown that the double-layered coated samples have greater cohesive strength than the monolayer. In single-layer coating adhesion is 1–2score at the bilayer – 0–1 score in ISO 2490.

A noticeable influence of destructive factors on the adhesion strength is not revealed. Morphology and elemental analysis of the coating showed that the coating is distributed uniformly over the surface and noticeable changes after the test in a climatic chamber have been detected.

Therefore, it could be concluded that the coatings deposited according to the proposed technology are resistant to the environment and can be used as coatings radio-reflectivity terrestrial reflector antenna.

Keywords: vacuum deposition, coating stack reflector antennas, polymeric composites.

Введение. Для развития современной телекоммуникационной техники необходимо решить проблему создания агрегатов с новыми сочетаниями свойств, которые нельзя обеспечить, применяя только металлы и традиционные технологические методы. Для обеспечения высокого уровня научных разработок и обеспечения конкурентных позиций отечественных производителей наземных систем связи необходимо разрабатывать перспективные методы проектирования и технологические процессы изготовления антенных рефлекторов.

Основной задачей, стоящей перед антенным рефлектором, является усиление сигнала. Эффективность решения этой задачи зависит от двух основных факторов: точность исполнения отражающей поверхности рефлекторов, задаваемая средним значением квадратичного отклонения (СКО) реальной поверхности от геометрической, и коэффициент отражения поверхности рефлектора. При этом важным является не только достижение заданных значений СКО, но и сохранение этих характеристик при различных условиях эксплуатации антенного рефлектора в условиях деструктивных факторов окружающей среды.

Основными дестабилизирующими факторами, воздействующими на антенный рефлектор, являются ветер, дождевание, тепловые колебания, ультрафиолетовое воздействие.

В настоящее время антенные конструкции, стойкие к ветровым нагрузкам, дождеванию, циклическому изменению температуры, обладающие высокой жесткостью, прочностью, близким к нулю коэффициентом температурного расширения, создаются, как правило, из композиционных материалов на полимерной основе. Прочность таких материалов позволяет заменить ими многие металлические детали, а их высокие удельные характеристики – значительно уменьшить массу изделий. В связи с этим в последнее время перспективным направлением науки и техники является изготовление рефлекторов из ПКМ (углепластика и стеклопластика). Уникальной возможностью полимерных углепластиков является ярко выраженная анизотропия свойств армированных слоев, которая наряду с наличием больших технологических возможностей по реализации практически любых схем армирования позволяет получать конструкции с большим отрицательным коэффициентом линейного термического расширения, чем КЛТР исходного армированного слоя [1; 2].

Анализ литературных данных указывает на несколько важных моментов. Первый момент связан с тем, что большая часть работ по данной тематике посвящена космическому назначению антенных рефлекторов [3–5]. Другим важным моментом является тот факт, что при наличии на рынке антенных рефлекторов из ПКМ наземного использования наблюдается очень малое количество публикаций по вопросам влияния условий эксплуатации таких рефлекторов на качество связи. Все это обусловливает актуальность настоящего исследования.

В состав изготавливаемых современных систем связи входят высокоточные углепластиковые рефлекторы антенн диаметром от 0,6 до 3,0 м, работающие в высокочастотных (*Ku*-, *K*-, *Ka*-) диапазонах. Их преимущество заключается в том, что малые длины волн и высокая частота передачи и приема информации позволяют передавать большие объемы информации, предоставлять более качественные услуги связи. Кроме того, занятость более низких диапазонов частот с каждым годом растет, вынуждая операторов систем связи переходить на более высокие частоты [3–6]. Собственное отражение радиосигнала у углепластика в высокочастотном диапазоне недостаточное (85–92 %). Для повышения эффективности антенно-фидерных систем необходимо обеспечить максимальное отражение радиоизлучения рефлекторами антенн с целью увеличения мощности излучения и отношения сигнал/шум. Нанесение на рабочую поверхность рефлектора тонкопленочного покрытия из металла с высокой электропроводностью должно придать требуемое значение коэффициента отражения поверхности рефлектора. Тонкоплёночное покрытие представляет собой многослойную структуру, где каждый слой отвечает за определённую функцию [7–9]. При создании радиоотражающего покрытия необходимо учитывать множество факторов, непосредственно влияющих на возможность применения разработанной схемы в конструкции АФС, начиная со структуры (изотропности) поверхности углепластиковой подложки, состава, толщины материалов слоев радиоотражающего покрытия, согласования их электрохимических, тепловых, адгезионных, прочностных характеристик и заканчивая стабильностью характеристик покрытий к воздействию деструктивных факторов.

Технология изготовления рефлекторных антенн предполагает, что метод осаждения покрытия должен обеспечивать равномерность его толщины по всей площади подложки. В первую очередь это связано

с тем, что тонкие пленки при разных толщинах могут отличаться уровнем проводимости, что напрямую влияет на коэффициент отражения излучения [7].

В течение эксплуатации поверхность радиоотражающих покрытий антенных рефлекторов подвергается различным воздействиям, которые могут ухудшать эксплуатационные характеристики покрытия, а также самого рефлектора. Так, основными факторами воздействия являются влага, обмерзание поверхности рефлектора, воздействие пылью, песком или другими частицами [10]. В связи с этим существует потребность исследования влияния деструктивных факторов на характеристики покрытий рефлекторов.

Экспериментальные исследования. Для проведения исследований было проведено напыление одно- и двухслойных покрытий на образцы из углепластиков и стеклопластиков. Однослойное покрытие состояло только из радиоотражающего слоя – алюминия. В двухслойных покрытиях первый слой материала – это подслой, связывающий основной функциональный слой и подложку, а второй – основной функциональный слой материала, выполняющий функцию радиоотражения. Подслой выполняет две функции: обеспечивает прочную адгезионную связь с материалами подложки и основного покрытия и гальванически разделяет углеродсодержащую подложку (углепластик) и алюминий. Нами был выбран нихром, имеющий высокие адгезионные характеристики к неметаллам и металлам, химическую устойчивость, коэффициент температурного расширения, промежуточный по сравнению с углепластиком и алюминием, низкую стоимость, доступность и хорошие технологические свойства. Толщина подслоя из нихрома предварительно определена в указанном ранее [4] диапазоне: от 50 до 200 нм. Выбор толщины радиоотражающего слоя алюминия проведен с учетом результатов предыдущих работ [11].

Для защиты композиции от внешних факторов может применяться третий, защитный, радиопрозрачный слой, защищающий радиоотражающий слой от механических, коррозионных и прочих повреждений. Этот слой может быть выполнен из оксидов металлов и неметаллов или полимеров. В большинстве случаев для защиты антенн космических аппаратов от истирания применяют покрытия из оксида кремня толщиной 10 до 200 нм. Испытание экспериментальных образцов [10; 12; 13] показали, что слой оксида кремния ввиду его малой толщины не дает эффективной защиты антенных рефлекторов наземных систем связи от деструктивных факторов окружающей среды, а также данный метод является затратным, поэтому в качестве защитного слоя целесообразнее использовать радиопрозрачные полимерные покрытия.

Для отработки технологий вакуумного нанесения покрытий была изготовлена серия образцов радиоотражающих покрытий на углепластике и стеклопластике методом магнетронного распыления. Изготовленные образцы представлены на рис. 1.

Для нанесения радиоотражающих покрытий была разработана и изготовлена вакуумная установка магнетронного испарения, позволяющая наносить многослойные покрытия и проводить дегазацию и очистку подложки за один цикл. Данная установка может наносить различные металлы и их соединения, а также позволяет работать в различных режимах и диапазонах работы.

В настоящее время самым перспективным способом для нанесения радиоотражающего слоя на рефлекторы антенн является ионно-плазменный [7; 14–17]. Данный способ позволяет наносить как однослойные, так и многослойные покрытия без извлечения изделия из вакуумной камеры, что приводит к повышению качества получаемого слоя, позволяет контролировать скорость нанесения и толщину покрытия, а также дает возможность наносить различные соединения металлов (оксиды, карбиды, нитриды). Технология ионно-плазменного нанесения многослойных радиоотражающих покрытий на изделия различной геометрии и большой площади весьма сложна. Она требует взаимодействия многих систем и агрегатов высоковакуумной установки (системы термического отжига, магнетронов и ионных источников, напуска рабочего газа, механических приводов, систем контроля и т. д.) в реальном масштабе времени [8; 14; 17–19]. Все это обусловливает необходимость создания автоматической системы управления установкой и формулирует требования к ней.

Рис. 1. Образцы с покрытием (лицевая сторона и тыльная сторона)

Разработанная установка состоит из вакуумной камеры из нержавеющей стали с охлаждающим контуром (рис. 2). Внутренние размеры камеры: диаметр – 800 мм; высота – 1100 мм.

Основой установки являются два вакуумных насоса – форвакуумный и турбомолекулярный, которые позволяют создавать в установке вакуум на уровне 10^{-4} Па. В состав разработанного рабочего оборудования для нанесения покрытий на рефлекторы антенн входит протяженная магнетронная распылительная система APEL-ML-1000 с габаритными размерами 40×140×940 мм.

Схема вакуумной установки и расположение рабочих элементов показано на рис 3. Подложки с образцами, устанавливаются на манипулятор, который крепится на верхнем фланце камеры через изолированный водоохлаждаемый вакуумный вывод. Манипулятор с подложками вращается вокруг установленного в центре оборудования при помощи шагового двигателя. Таким образом, может осуществляться изменение положения подложек относительно магнетронов, ионного источника и нагревателя.

Ионный источник предназначен для очистки поверхности подложки потоком ионов перед осаждением покрытия, так как химическая отчистка не исключает остаточных включений на поверхности образцов, что влияет на качество нанесенного слоя.

Нагревательный элемент позволяет термически воздействовать на подложки с целью улучшения адгезионной прочности между покрытием и подложкой. Процедура осаждения радиоотражающего покрытия на поверхность рефлектора на установке включает в себя следующие операции:

– тепловая дегазация рефлектора;
– очистка поверхности рефлектора с помощью ионного пучка;
– осаждение адгезионного слоя из сплава Ni–Cr;
– осаждение плёнки алюминия.

Параметры обработки варьировались в следующих пределах:

– мощность 0,5–1,5 кВт;
– ток 1–4 А;
– напряжение 350–432 В;
– давление в камере $1{,}8\cdot10^{-1}$–$3{,}1\cdot10^{-1}$ Па;
– время 60–1200 с.

Для напыления использовали мишени из нихрома Х20Н80 ГОСТ 10994 и алюминия чистотой 99,999 по ГОСТ 25905.

После нанесения покрытий на образцах из ПКМ были проведены ускоренные климатические испытания (УКИ). Для определения влияния деструктивных факторов окружающей среды до и после УКИ была проведена оценка адгезионной прочности, измерение толщины и массы образцов с покрытием и исследована морфология и стехиометрический состав покрытий.

Исследования влияния деструктивных факторов окружающей среды на образцы из ПКМ проводили в испытательной климатической камере ATLAS Weather-Ometer Ci 3000+, внешний вид и схема которой приведены на рис. 4. Камера позволяет моделировать воздействие повышенной температуры и относительной влажности воздуха, дождевых осадков и солнечного излучения. Оборудование оснащено ксеноновыми лампами, имеющими наиболее близкий спектр излучения к дневному свету, что облегчает корреляцию с экспозициями при дневном свете.

Испытания проводились согласно ГОСТ РВ 20.57.416 [12; 13] в течение 120 ч, с перерывом по 16 ч. Интенсивность излучения составила порядка 300–800 нм, и интегральная плотность теплового потока – 1120 Вт/м^2, включая излучение, отражаемое от стенок камеры. Интенсивность УФ-излучения была равна 69 Вт/м^2. Испытания проводились при влажности до 98 % и температуре до +70 °С. Размещение образцов в камере изображено на рис. 5.

Рис. 2. Внешний вид вакуумной установки

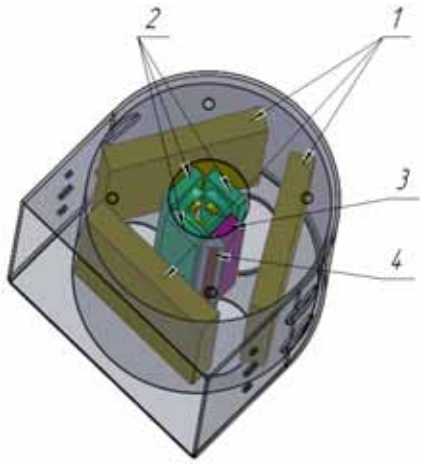
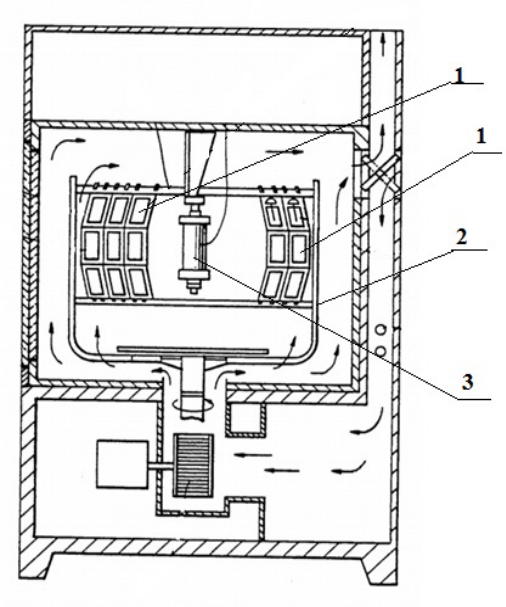


Рис. 3. Взаимное размещение компонентов вакуумной камеры:
1 – подложки; *2* – магнетроны; *3* – ионный источник; *4* – нагревательный элемент



а *б*

Рис. 4. Внешний вид (*а*) и схема (*б*) климатической камеры:
1 – образцы; *2* – вращающийся барабан с закрепленными
на нем образцами; *3* – ксеноновая лампа

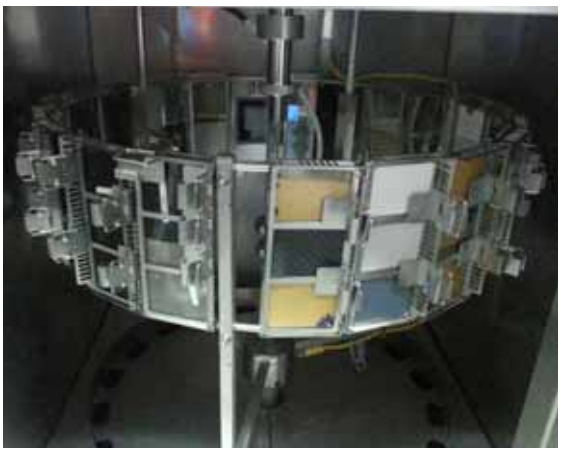


Рис. 5. Вращающийся барабан с размещенными
на нем образцами из углепластика и стеклопластика

В перечень определяемых показателей до и после УКИ входит:

– внешний вид радиоотражающего покрытия;

– изменение массы образца контролировали на весах ВЛАО -20 г;

– толщину напыленных слоев алюминия и нихрома определяли на стеклянных образцах-свидетелях на микроинтерферометре МИИ-4;

– определение адгезионной прочности определяли методом поперечных надрезов с помощью тестера адгезии ELCOMETR-107;

– исследование морфологии осуществлялось на низковакуумном сканирующем электронном микроскопе TM-3000 (Hitachi);

– исследования химического состава покрытия проводили с помощью энергодисперсионного спектрометра с системой микрорентгеноспектрального анализа Quantax-70 (Bruker);

– коэффициент радиоотражения измеряли волноводным методом с помощью генератора Anritsu MG3696B, аттенюатора Д3-35 и измерительной линии Р1-30.

Результаты и обсуждения. Осмотр внешнего вида образцов радиоотражающих покрытий показал, что после проведенных ускоренных испытаний внешний вид покрытий не изменился. Измерение массы образцов и толщины покрытий до и после УКИ показали, что они остались неизменными, в пределах погрешности приборов. На образцах радиоотражающих покрытий на углепластике без адгезионного подслоя наблюдается незначительное ухудшение адгезии. Так, у однослойного покрытия адгезия составляет 1–2 бал-

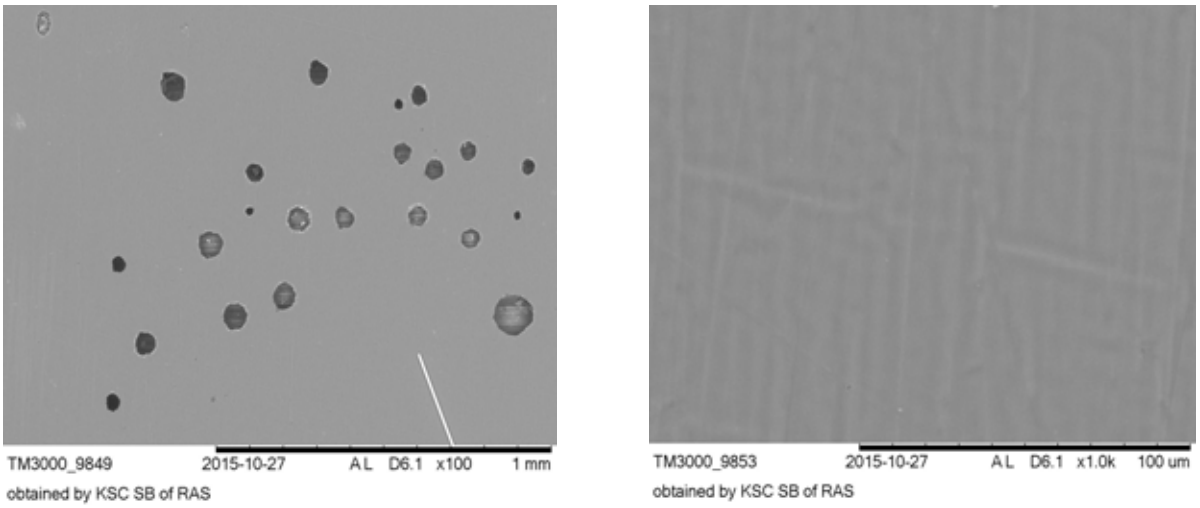
ла по ISO 2490, в то время как двухслойное покрытие «нихром + алюминий» имеет адгезию 0–1 балл. Возможно, это может быть объяснено возникновением электрохимического взаимодействия алюминия и углеволокна, что приводит к коррозионным повреждениям. В то же время уменьшение адгезии после УКИ не наблюдается ни у двухслойных, ни у однослойных покрытий. Одно- и двухслойные покрытия на образцах стеклопластика имеют хорошую адгезионную прочность как до, так и после УКИ. В среднем она составляет 0–1 балл по ISO 2490.

Исследования морфологии и химического состава покрытий проводили на низковакуумном сканирующем электронном микроскопе TM-3000 (Hitachi) со встроенным энергодисперсионным спектрометром и системой микрорентгеноспектрального анализа Quantax-70 (Bruker) (изображения получали в обратно отраженных электронах при ускоряющем напряжении 15 кВ). Результаты представлены на рис. 6–10.

Выявлено, что образцы с покрытиями имеют дефекты в виде пор размерами 1–10 мкм, выступающих волокон на поверхность материала, неровностей и пр. (рис. 6, *а*). Данные дефекты возникли на этапе производства углепластиков и стеклопластиков и очевидно связаны с несовершенством технологии получения образцов из ПКМ. На участках материала, где отсутствуют дефекты, покрытие нанесено равномерно, дефектов на покрытиях не выявлено (рис. 6, *б*).

Химический анализ образцов до УКИ, результаты которого представлены на рис. 7, 8 показал, что в покрытиях есть большое количество алюминия и кислорода, а также углерода, который входит в состав ПКМ. Вследствие того, что нанесенные слои имеют малую толщину, на результаты стехиометрического анализа большое влияние оказывает состав образцов из ПКМ (углерод, азот), тем не менее анализ отчетливо показывает равномерное распределение алюминия на поверхности образца (рис. 8). Наличие кислорода объясняется присутствием оксидной пленки на поверхности алюминия.

На электронно-микроскопических изображениях образцов после проведения УКИ поры в покрытии также не выявлены, покрытие равномерное, следы коррозионного разрушения и отслаивание покрытия не обнаружено.



а *б*

Рис. 6. Поверхность однослойного покрытия на образце из углепластика до УКИ: x100 (*а*); x1000 (*б*)

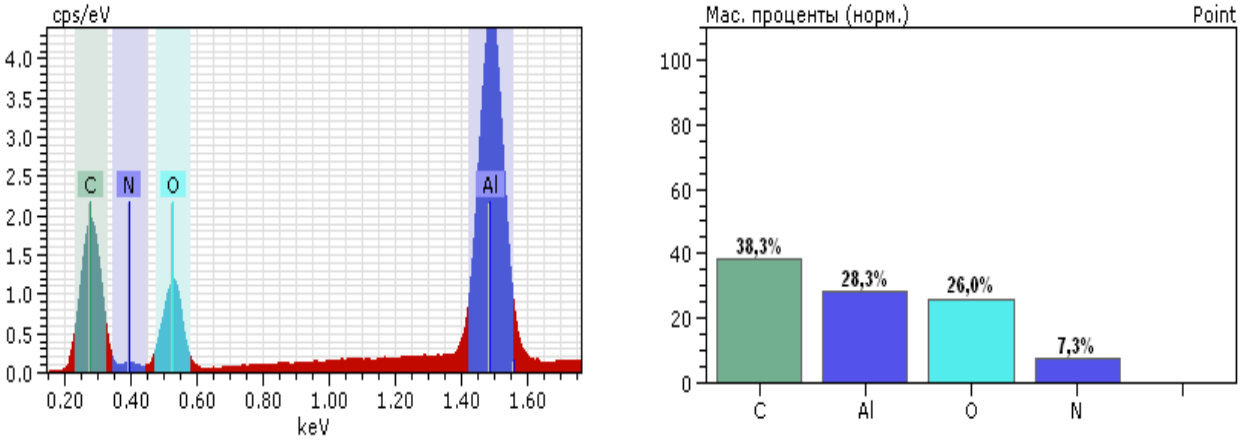


Рис. 7. Результаты химического анализа образца из ПКМ до УКИ (распределение элементов по поверхности)

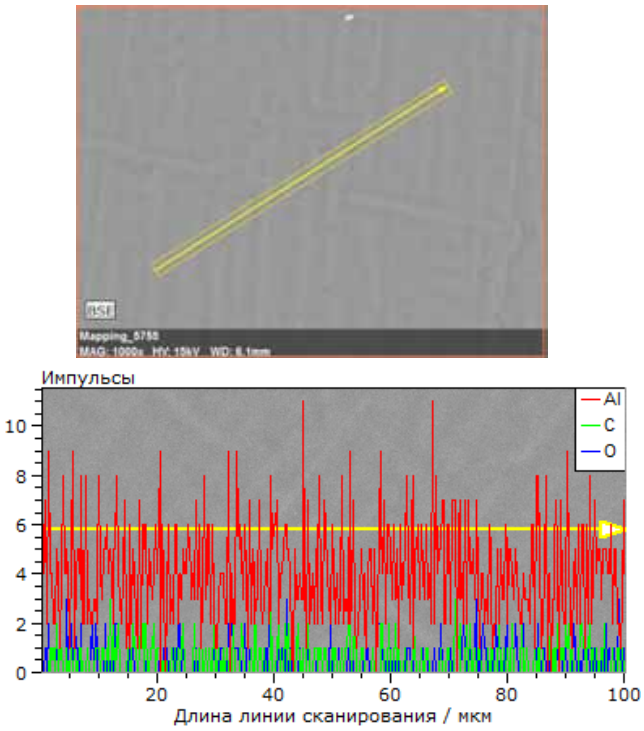
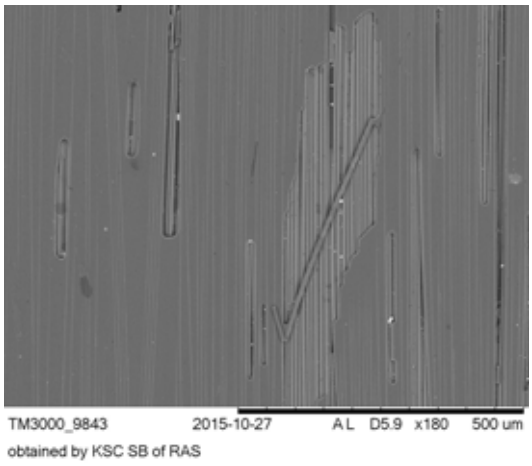
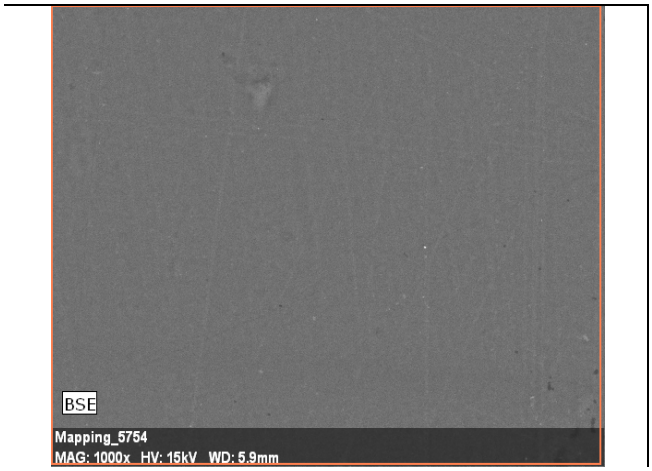


Рис. 8. Распределение химических элементов
по поверхности образца с покрытием до УКИ

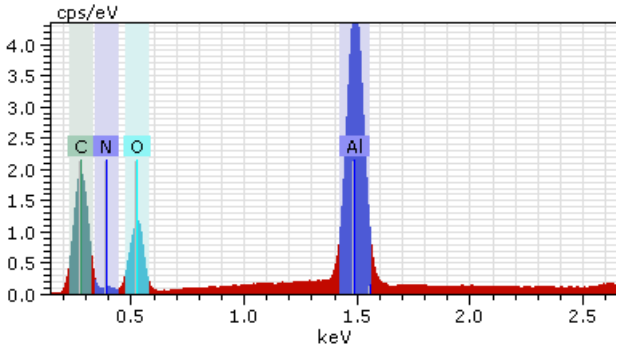


а



б

Рис. 9. Поверхность однослойного покрытия на образце из углепластика после УКИ:
x100 (*а*); x1000 (*б*)



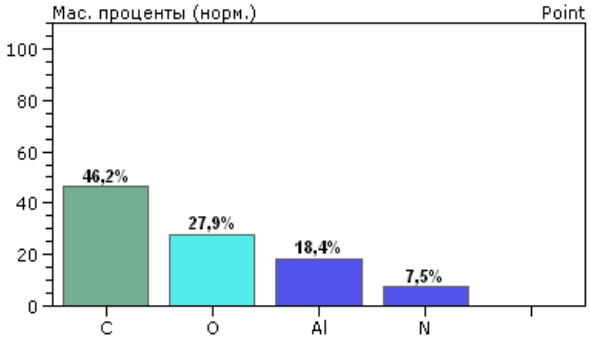


Рис. 10. Результаты химического анализа образца из ПКМ после УКИ
(распределение элементов по поверхности)

Следует отметить незначительное увеличение содержания кислорода в образцах после проведения УКИ.

Измерения коэффициентов радиоотражения показали, что при частоте 24 ГГц коэффициенты радиоотражения всех образцов до и после УКИ соответствуют предъявляемым требованиям и составляют около 0,98.

Заключение. В результате работы была разработана схема компоновки оборудования вакуумной камеры, позволяющая получать более качественные многослойные покрытия. Благодаря увеличению количества магнетронов и оптимальному расположению манипулятора с подложками, занимающего максимальный объем, увеличено количество одновременно напыляемых образцов. При помощи ионного излучателя и нагревательного элемента возможна наиболее полная подготовка поверхности подложки перед нанесением покрытия, что благоприятно влияет на адгезию, а значит, на качество напыляемого покрытия.

Были получены образцы из ПКМ с радиоотражающим покрытием, состоящим из двух слоев, для рефлекторов антенн наземного использования. Полученные образцы были исследованы на воздействие деструктивных факторов с помощью ускоренных климатических испытаний, была проведена оценка адгезионной прочности и исследована морфология и стехиометрический состав покрытия. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– радиоотражающее покрытие на углепластике и стеклопластике имеет хорошую адгезионную прочность, в среднем она составляет 0–1 балл по ISO 2490; после проведения УКИ уменьшение адгезии не наблюдалось;

– образцы с покрытиями имеют дефекты в виде пор размерами 1–10 мкм, выступающих волокон на поверхность материала, неровностей и пр., которые возникли на этапе производства углепластиков и стеклопластиков. На участках материала, где отсутствуют дефекты, покрытие нанесено равномерно, дефектов на покрытиях не выявлено. На микрофотографиях образцов после проведения УКИ поры в покрытии также не выявлены, покрытие равномерное, следы коррозионного разрушения и отслаивание покрытия не обнаружены.

– химический анализ образцов до УКИ показал в покрытиях большое количество алюминия и кислорода, а также углерода, который входит в состав ПКМ.

– коэффициенты радиоотражения всех образцов до и после УКИ соответствуют предъявляемым требованиям и составляют около 0,98.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/к.

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, the state contract № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/k.

Библиографические ссылки

1. Baril S., Hellmich A. Qualifications large deployable reflector ka-band // EADS Space Transportation BP 3002 – 78133 Les Mureaux – France. 20 p.

2. The development of the design and development of the reflector in the company saab ericsson space / Malmborg Per [et al.] Gothenburg, Sweden: Saab Ericsson Space AB, SE-405. 15 p.

3. Stute Th. Optical reflectors mission planck esa. Eads-Astrium Gmbh : Friedrichshafen, 2008. P. 150–165.

4. Разработка технологии нанесения радиоотражающих покрытий / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 222–226.

5. Пащенко О. В., Соловьев А. М., Юдаков С. В. Система управления промышленной установкой «КО/МРК» // Известия Томского политехн. ун-та. 2012. Т. 320, № 5. С. 100–104.

6. Характеристики радиоотражающих покрытий на образцах из полимерных композиционных материалов, изготовленных по технологии трансферного формования / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ 2014. № 4(56). С. 236–243.

7. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. М. : Радио и связь, 1982. 72 с.

8. Плазменная технология осаждения отражающего покрытия на поверхность углепластика / О. Х. Асаинов [и др.] // Известия вузов. Сер. «Физика». 2011. Т. 54, № 11/2. С. 158–161.

9. Обработка поверхности материалов плазмой магнетронного разряда и ионными пучками / О. Х. Асаинов [и др.] // Известия вузов. Сер. «Физика». 2009. Т. 52, № 11/2. С. 172–175.

10. Испытание образцов радиоотражающих покрытий на стойкость к внешним воздействующим факторам / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 4 (50). С. 227–230.

11. Mohan S. A., Ghanashyam Krishna M. Review of ion beam assisted deposition of optical thin films // Vacuum. 1995. Vol. 46, № 7. P. 645–659.

12. Испытания лабораторных образцов терморегулирующих покрытий углепластиковых элементов космических аппаратов / В. И. Халиманович [и др.] // Вестник СибГАУ. 2009. № 3(24). С. 110–115.

13. Исследование свойств защитных покрытий для космических аппаратов / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 217–224.

14. Жуков В. В., Кривобоков В. П., Янин С. Н. Распыление мишени при ассистировании магнетронного разряда ионным пучком // Известия Томского политехн. ун-та. 2004. Т. 307, № 7. С. 40–45.

15. Исследование состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 216–219.

16. Handbook of thin-film deposition process and techniques / edited by K. K. Schuegraf // Noyes Publications. New Jersey, 1988. 413 p.

17. Neumann M., Web Milde F., Schiller S. Coating by Reactive Plasma Activated Evaporation and Sputtering Processes // Society of Vacuum Coaters. 1996. № 39. P. 371–377.

18. CVD-processes by hollow cathode glow discharge / Hellmich A. [et al.] // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 98. P. 1541–1546.

19. Bunshah R. F. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Park Ridge, NJ : Noyes Publications. 1994. 131 p.

References

1. Baril S., Hellmich A. Qualifications large deployable reflector ka-band. *EADS Space Transportation BP* 3002 – 78133 Les Mureaux – France, 20 p.

2. Malmborg Per, Ingvarson Per, Petersson Mikael, Woxlin Karin. The development of the design and development of the reflector in the company saab ericsson space. *Gothenburg, Sweden, Saab Ericsson Space AB, SE-405,* 15 p.

3. Stute, Thomas. Optical reflectors mission planck esa / eads-astrium gmbh. *Friedrichshafen*, Germany, P. 150–165.

4. Mikheev A. E., Girn A. V., Kharlamov V. A., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [Development of technology for the application of radio-reflective coatings]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 4(50), P. 222–226 (In Russ.).

5. Pashchenko O. V., Solov'ev A. M., Yudakov S. V. [Control systems for industrial installation "KO/MPK"]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 320, No. 5, P. 100–104 (In Russ.).

6. Mikheev A. E., Chernyatina A. A., Evkin I. V., Vlasov A. Yu., Martynov V. A. [Features Radio reflective coatings on samples of polymeric composite materials made on technology transfer molding]. *Vestnik SibGAU*, 2014, No. 4(56), P. 236–243 (In Russ.).

7. Danilin B. S., Syrchin V. K. *Magnetronnye raspylitel'nye sistemy* [Magnetron sputtering systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982, 72 p.

8. Asainov O. Kh., Bainov D. D., Krivobokov V. P., Romanenko S. E., Chernyatina A.A. [The plasma deposition technique on the surface of the reflective coating CFRP]. *Izvestiya vuzov. Ser. Fizika*, 2011, Vol. 54, No. 11/2, P. 158–161 (In Russ.).

9. Asainov O. Kh., Bainov D. D., Krivobokov V. P., Yudakov S. V. [Surface treatment of materials by plasma magnetron discharge and ion beams]. *Izvestiya vuzov. Ser. Fizika*, 2009, Vol. 52, No. 11/2, P. 172–175 (In Russ.).

10. Mikheev A. E., Ivasev S. S., Kuznetsov A. B., Bashkov I. V., Ravodina D. V. [Test specimens radio reflective coatings for resistance to external factors]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 4(50), P. 227–230 (In Russ.).

11. Mohan S. A review of ion beam assisted deposition of optical thin films. *Vacuum*, 1995, Vol. 46, No. 7, P. 645–659.

12. Khalimanovich V. I., Kharlamov V. A., Ermolaev R. A., Mikheev A. E., Girn A. V. [Testing laboratory samples thermal control coating of carbon fiber elements of outer units]. *Vestnik SibGAU*, 2009, No. 3(24), P.110–115 (In Russ.).

13. Mikheev A. E., Girn A. V., Ivasev S. S., Evkin I. V. [Investigation of the properties of protective coatings for spacecraft]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 3(49), P. 217–224 (In Russ.).

14. Zhukov V. V., Krivobokov V. P., Yanin S. N. [Sputtering target for assisting Magnetron discharge ion beam]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, Vol. 307, No. 7, P. 40–45 (In Russ.).

15. Mikheev A. E., Kharlamov V. A., Kryuchek S. D., Chernyatina A. A., Khomenko I. I. [Study of the composition of the residual gas and plasma in the chamber vacuum coaters]. *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 2(48), P. 216–219 (In Russ.).

16. Handbook of thin-film deposition process and techniques: edited by K. K. Schuegraf. *Noyes Publications*, New Jersey, 1988, 413 p.

17. Neumann M., Web Milde F., Schiller S. Coating by Reactive Plasma Activated Evaporation and Sputtering Processes. *Society of Vacuum Coaters*, 1996, No. 39, P. 371–377.

18. Hellmich A., Jung T., Kielhorn A., Ribland M. CVD-processes by hollow cathode glow discharge. *Surf. Coat. Technol*, 1998, Vol. 98, P. 1541–1546.

19. Bunshah R. F. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1994, 131 p.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В., Хоменко И. И., Алякрецкий Р. В., 2015

УДК 62-987

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 907–916

РАСЧЕТ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ОТВОДЕ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА АКУСТИКО-ВИХРЕВЫМ МЕТОДОМ

С. Ф. Тимушев, Д. В. Клименко*

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4
*E-mail: srmitriy@gmail.com

Большое значение в настоящее время отводится исследованию проблемы повышения надёжности и ресурса жидкостных ракетных двигателей. В этой связи ключевой задачей является снижение гидродинамической вибрации шнекоцентробежных насосов, которая вызвана пульсациями давления в проточной части насоса. Вследствие шаговой неравномерности потока на выходе рабочего колеса возникают пульсации давления на частоте следования рабочих лопаток и её гармониках. Эти колебания вызывают динамические нагрузки на элементы корпуса насоса, вызывая его вибрацию, поэтому расчет амплитуд пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе на ранней стадии проектирования является актуальной задачей. В определении пульсаций давления, генерируемых трехмерным вихревым течением в шнекоцентробежном насосе, необходимо принимать во внимание их двойственную природу. Неоднородное распределение параметров потока на выходе центробежного колеса генерирует акустические возмущения, которые распространяются со скоростью звука в рабочей жидкости. Одновременно присутствуют вихревые возмущения, которые конвектируются основным течением. Вихревые колебания параметров основного течения называют «псевдозвуком» или вихревой модой. Амплитуда колебаний вихревой моды может быть определена расчетом нестационарного потока с использованием модели несжимаемой жидкости. Однако эта модель неприменима для акустических колебаний, распространяющихся в напорной магистрали. Рассматривается трехмерный акустико-вихревой метод расчёта пульсаций давления, который обеспечивает возможность определения амплитуды акустической моды. Приведен вывод акустико-вихревых уравнений и пример расчёта амплитуды пульсаций давления на выходе шнекоцентробежного насоса жидкостного ракетного двигателя. Показано, что амплитуда пульсаций давления на первой гармонике частоты следования рабочих лопаток изменяется в зависимости от расхода через насос. Применение в расчете граничного условия в форме акустического импеданса для длинной трубы приводит к занижению амплитуды по сравнению с известными экспериментальными величинами.

Ключевые слова: шнек, центробежный насос, отвод, пульсации давления, акустико-вихревой.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 907–916

COMPUTATION OF PRESSURE PULSATIONS IN THE OUTLET DEVISE OF SCREW-CENTRIFUGAL PUMP WITH ACOUSTIC-VORTEX METHOD

S. F. Timushev, D. V. Klimenko*

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4, Volokolamskoye highway, Moscow, 125993, Russian Federation
*E-mail: srmitriy@gmail.com

Studies in the problem of the liquid rocket engine reliability and service life increasing have a great importance. In this paper the key objective is to reduce the hydrodynamic vibration of screw-centrifugal pump, which is caused by pressure pulsations in the pump flow path. Due to the uneven impeller outlet flow pressure pulsations occur at a blade passing frequency and its harmonics. These oscillations cause dynamic loads on the pump housing, causing it to vibrate, so the calculation of the amplitudes of pressure pulsations in a screw-centrifugal pump at an early development stage is an urgent task. In determining the pressure pulsation generated by three-dimensional vortex flow in the screw-centrifugal pump one must take account of their dual nature. Inhomogeneous distribution of the flow at the outlet of the impeller generates acoustic disturbances that spread with the speed of sound in the working fluid. At the same time there are eddy disturbances that convert with the main flow. Vortex fluctuations in the parameters of the main flow is called "pseudosound" or vortex mode. The oscillation amplitude of the vortex mode can be determined with the unsteady flow computation using the incompressible fluid model. However, this model is not applicable for acoustic fluctuations spreading in the pressure pipe. In this article a three-dimensional acoustic-vortex method is developing for

calculation the pressure pulsations, which provides the possibility of determining the acoustic mode amplitude. There is outlined derivation of acoustic vortex equations and example of calculation the amplitude of the pressure pulsations at the screw-centrifugal pump outlet of liquid rocket engine. The amplitude of pressure pulsations at the first harmonic of blade passing frequency varies depending on the flow rate through the pump. Application boundary condition in the form of acoustic impedance for the long outlet pipe leads to an underestimation of the amplitude in comparison with known experimental values.

Keywords: screw, centrifugal pump, outlet device, pressure pulsations, acoustic-vortex.

Введение. В настоящее время все большее значение придается исследованию проблем повышения надежности и ресурса жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). В этой связи повышение надежности системы подачи компонентов топлива ЖРД, прежде всего турбонасосных агрегатов (ТНА), является ключевой проблемой. Узловым элементом ТНА является основной высокооборотный шнекоцентробежный насос компонента топлива (окислителя или горючего), обеспечивающий подачу рабочей жидкости в камеру сгорания и газогенератор при высоком давлении (свыше 100 бар). Шнекоцентробежный насос является основным источником гидродинамической вибрации системы подачи современных ЖРД. Гидродинамическая вибрация центробежного насоса является серьезной проблемой на пути повышения его надежности и ресурса на протяжении длительного времени. Первые упоминания об этой проблеме появляются в 60-х годах прошлого века в связи с разрушением крупных насосов [1; 2]. Гидродинамическая вибрация возбуждается пульсациями давления, возникающими в проточной полости насоса вследствие разных по своей природе гидродинамических причин [3; 4], которые включают вихреобразование, рециркуляцию потока, кавитацию, шаговую неравномерность параметров потока на выходе центробежного колеса. Последний фактор обусловливает генерацию пульсаций давления на так называемых лопаточных частотах или на частоте следования лопаток (ЧСЛ) и ее высших гармониках и комбинационных частотах. Эти колебания давления являются неотъемлемой частью рабочего процесса центробежного насоса. В центробежных насосах они имеют высокую амплитуду вследствие особенностей формирования шаговой неоднородности потока в центробежной лопаточной решетке. Хорошо известно, что физическая природа пульсаций давления в центробежном насосе представляет собой суммарное проявление псевдозвуковых и акустических колебаний. Псевдозвуковые колебания быстро затухают вниз по течению от ротора [5], оставляя в напорном трубопроводе только акустическую моду колебаний давления. Определение амплитуды пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе на ранней стадии проектирования является актуальной задачей. В определении пульсаций давления, генерируемых трехмерным вихревым течением в шнекоцентробежном насосе, необходимо принимать во внимание, что неоднородное распределение параметров потока на выходе центробежного колеса генерирует акустические возмущения, которые распространяются со скоростью звука в рабочей жидкости. Одновременно присутствуют вихревые возмущения, которые конвектируются основным течением. Такие колебания параметров основного течения называют «псевдозвуком» [6; 7] или вихревой модой [8–10].

На двойственную природу пульсаций давления в центробежных насосах указывалось еще в ранних работах Покровского [3], далее указанный подход начал развиваться в работах Тимушева и соавторов [11] применительно к двумерной постановке задачи определения пульсаций давления в центробежном насосе с безлопаточным диффузором и спиральной улиткой. Течение в современных шнекоцентробежных насосах ЖРД имеет существенный трехмерный характер, поэтому возникает необходимость в адаптации акустико-вихревых уравнений для трехмерного случая.

Адаптация акустико-вихревого метода для трехмерного течения. В данной работе метод расчета пульсаций давления с использованием подходов вычислительной гидродинамики и акустики развивается для случая трехмерного потока в шнекоцентробежном насосе с направляющим аппаратом и спиральным сборником.

При этом используется представление нестационарного движения сплошной среды как совокупности акустической и вихревой мод движения.

Физико-математическая модель генерации акустико-вихревых колебаний основана на представлениях, выдвинутых Ландау, Блохинцевым, Артамоновым [1–3], с применением декомпозиции граничных условий с использованием комплексного акустического импеданса [11].

Как уже отмечено выше, при разработке физико-математической модели пульсационного течения в шнекоцентробежном насосе необходимо учитывать нелинейный характер процесса генерации колебаний нестационарным потоком и акустический характер их распространения в проточной части насоса.

Приняты следующие допущения:

– поток дозвуковой;

– течение изоэнтропийное;

– вязкая диффузия не учитывается для распространения акустических колебаний;

– акустические колебания (вследствие сжимаемости среды) существенно меньше по сравнению с вихревыми колебаниями (вихревого и поступательного движения жидкости).

Вводится акустическая и вихревая моды движения рабочей жидкости, так как на основании теоремы Коши–Гельмгольца скорость движения сжимаемой жидкости можно представить в виде векторной суммы основного поступательного и вращательного движения жидкости как несжимаемой среды (вихревой моды) и малых колебаний, обусловленных сжимаемостью среды (акустической моды).

В качестве основной физической причины нестационарного процесса генерирования пульсаций давления в шнекоцентробежном насосе на частотах следования рабочих лопаток рассматривается перенос вихревых возмущений, которые возникают в результате движения периодически неоднородного потока с окружной скоростью U_2 центробежного колеса относительно отводящего устройства. Такая модель генерации колебаний в литературе называется взаимодействием «ротор–статор». Затухание акустических возмущений, обусловленных вязкостью, а также тепловые явления имеют здесь второстепенное значение, и для упрощения соответствующие члены не будут учитываться в уравнениях движения, течение считается изоэнтропическим. Основные уравнения движения сжимаемой среды записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}+\nabla\frac{V^2}{2}-\nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{V}\right)=-\frac{\nabla P}{\rho}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\left(\rho\mathbf{V}\right)=0, \tag{2}$$

$$s=\text{const}. \tag{3}$$

$$\mathbf{P}=2\mu\,\mathbf{S}-(p+{}^{2}\!/_{3}\,\mu\,\nabla\cdot\mathbf{V})\mathbf{E}. \tag{4}$$

В изоэнтропическом течении приращения энтальпии, давления и плотности связаны термодинамическими соотношениями

$$di=\frac{dP}{\rho}, dP=a^2 d\rho, \tag{5}$$

где a – скорость звука в рабочей среде.

С учетом соотношений (5), пренебрегая вязкостью в зоне распространения возмущений, перепишем уравнения (1) и (2) в форме, удобной для дальнейших преобразований:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}+\nabla\frac{V^2}{2}-\nabla\times\left(\nabla\times\mathbf{V}\right)=-\nabla i, \tag{6}$$

$$\frac{1}{a^2}\left(\frac{\partial i}{\partial t}+\left(\nabla i\right)\mathbf{V}\right)+\nabla\mathbf{V}=0. \tag{7}$$

На основании теоремы Коши–Гельмгольца нестационарную скорость жидкости можно определить в виде суммы скорости **U** вихревой моды (поступательного и вращательного движения абсолютно несжимаемой среды) и скорости акустического движения $\mathbf{V}_a$.

Введем скалярную функцию – акустический потенциал φ. Тогда акустическая скорость

$$V_a=\nabla\varphi. \tag{8}$$

Таким образом, для скорости жидкости получается следующее выражение:

$$\mathbf{V}=\mathbf{U}+\nabla\varphi=\mathbf{U}+V_a. \tag{9}$$

Метод разложения уравнений движения сплошной среды в форме (9) широко применяется в задачах аэроакустики [12] и гидродинамической устойчивости. В работе Артамонова [8], Тимушева [11] проведены преобразования основных уравнений движения в наиболее полном виде.

Будем рассматривать дозвуковое течение $M = U/a << 1$ с малыми акустическими колебаниями ($V_a << a$). Запишем также следующие очевидные соотношения:

$$\nabla\mathbf{U}=0, \nabla\times\mathbf{V}=\nabla\times\mathbf{U}=\zeta, \tag{10}$$

так как

$$\nabla\times V_a\equiv\nabla\times\nabla\varphi\equiv 0. \tag{11}$$

Таким образом вихревые возмущения потока определяются скоростью несжимаемого течения. Подставим теперь соотношение (9) в уравнение (6). После несложных преобразований уравнение (6) приводится к виду

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt}=-\nabla j+\nu\Delta\mathbf{U}+\nabla\varphi\times\zeta, \tag{12}$$

где

$$j=i+\frac{d\varphi}{dt}+\frac{1}{2}\left(\nabla\varphi\right)^2, \tag{13}$$

$$\frac{d}{dt}=\frac{\partial}{\partial t}+\mathbf{U}\nabla. \tag{14}$$

В уравнении (12) член $\nabla\varphi\times\xi$ отражает взаимодействие акустической и вихревой мод. В этом уравнении учитывается действие вязких сил, которые участвуют в формировании неоднородности распределения параметров течения по шагу лопаточной решетки рабочего колеса.

Теперь, выразив ***i*** из формулы (13) и подставив в уравнение (7), одновременно разделяя в нем скорость **V** на акустическую и вихревую моды, получим:

$$\frac{1}{a^2}\frac{d}{dt}\left(\frac{d\varphi}{dt}+\frac{\left(\nabla\varphi\right)^2}{2}\right)-\Delta\varphi+ \\ +\frac{1}{a^2}\nabla\varphi\nabla\left(\frac{d\varphi}{dt}+\frac{\left(\nabla\varphi\right)^2}{2}\right)=\frac{1}{a^2}\left(\frac{dj}{dt}+\nabla\varphi\nabla j\right). \tag{15}$$

С учетом ранее принятых допущений можно линеаризовать уравнение (15) относительно φ, и оно примет вид

$$\frac{1}{a^2}\frac{d^2\varphi}{dt^2}-\Delta\varphi=\frac{1}{a^2}\frac{dj}{dt}. \tag{16}$$

Из уравнений (15) и (16) видно, что нестационарное вихревое движение жидкости генерирует акустические колебания. В качестве источника акустических колебаний в неоднородном волновом акустическом уравнении выступает в правой части уравнения член $\frac{1}{a^2}\frac{dj}{dt}$.

В то же время энергия акустической моды может частично переходить в энергию вихревого движения, что выражается членом $\nabla\varphi\times\xi$ в уравнении (12).

В данной модели член $\nabla\varphi\times\xi$ опускается, что существенно упрощает задачу численного решения трехмерных акустико-вихревых уравнений на компьютере.

С учетом последнего допущения и линеаризации по φ соотношения (12), (13) записываются в следующем виде:

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} = -\nabla j + \nu\Delta\mathbf{U}, \qquad (17)$$

$$-\frac{d\varphi}{dt} = i - j. \qquad (18)$$

Таким образом, уравнения (17), (18) обеспечивают решение задачи расщепления основных уравнений движения сжимаемой жидкости на вихревую и акустическую моды. Уравнение (17) описывает вихревое турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости под действием нестационарного градиента давления $\nabla P_v = \rho_0 \nabla j$.

Продифференцируем уравнение (15), взяв полную производную по времени, и подставим в него выражение для $d\varphi/dt$ из формулы (18). После несложных преобразований получаем

$$\frac{1}{a^2}\frac{d^2 i}{dt^2} - \Delta i = -\Delta j. \qquad (19)$$

Возмущающую функцию в правой части уравнения (19) можно выразить через поле скоростей вихревой моды из уравнения (17):

$$-\Delta j = \nabla\left(\mathbf{U}\nabla\mathbf{U}\right) = \nabla\left(\nabla\left(\frac{1}{2}\mathbf{U}^2\right) - \mathbf{U}\times\zeta\right). \qquad (20)$$

Пренебрегая конвективными членами [11] в производной по времени уравнения (19), получаем:

$$\frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} - \Delta i = S, \qquad (21)$$

где через S обозначена возмущающая функция, определяемая из поля скоростей несжимаемого потока:

$$S = \nabla\left(\nabla\left(\frac{1}{2}U^2\right) - \mathbf{U}\times\zeta\right). \qquad (22)$$

Перейдем к безразмерным переменным. В качестве пространственного масштаба и характерной скорости возьмем радиус R_2 и окружную скорость u_2 на выходе центробежного колеса. Тогда безразмерные величины запишутся в следующем виде:

$$\tilde{x} = \frac{x}{R_2}; \quad \tilde{\mathbf{U}} = \frac{\mathbf{U}}{u_2};$$
$$\tilde{t} = \frac{t}{\left(2\pi R_2\right)/\left(z_1 u_2\right)} = t f_{b1}; \quad \tilde{i} = \frac{i}{u_2^2}. \qquad (23)$$

Введем Λ – безразмерную частоту, или число Гельмгольца:

$$\Lambda = \frac{R_2}{\lambda} = \frac{R_2}{a/f_{b1}} = \frac{f_{b1}R_2}{a} = \frac{u_2}{a}\frac{f_{b1}R_2}{u_2} = M\cdot St. \qquad (24)$$

Как правило, в центробежных насосах $\Lambda < 0{,}3$, поэтому для низких гармоник амплитуд пульсаций давления ЧСЛ конвективные члены в волновом уравнении можно не учитывать:

$$\Lambda^2\frac{\partial^2\tilde{i}}{\partial\tilde{t}^2} - \Delta\tilde{i} = \tilde{S}. \qquad (25)$$

Для невозмущенного потока акустический потенциал $\varphi = 0$ и

$$\tilde{i}_0 = \tilde{j}_0. \qquad (26)$$

Функции i и j можно выразить через средние величины и пульсационные составляющие:

$$\tilde{i} = \tilde{i}_0 + h; \quad \tilde{j} = \tilde{j}_0 + g. \qquad (27)$$

Амплитуда пульсаций давления в отводе шнекоцентробежного насоса на порядок ниже среднего давления, поэтому для колебаний энтальпии можно приближенно записать

$$h \approx \frac{\left(P - P_0\right)}{\rho_0 u_2^2} = \frac{P'}{\rho_0 u_2^2}. \qquad (28)$$

Аналогично для колебаний вихревой моды g

$$g \approx \frac{P_v'}{\rho_0 u_2^2}. \qquad (29)$$

Учитывая соотношения (27)–(29), можно преобразовать формулу (18) к виду

$$P' = P_v' - \rho_0\frac{d\varphi}{dt} = P_v' + P_a'. \qquad (30)$$

Последнее выражение наглядно показывает, что пульсации давления рабочей жидкости в отводе шнекоцентробежного насоса равны сумме пульсаций от нестационарного вихревого движения (как несжимаемой среды) – «псевдозвука» и акустических колебаний.

Принимая во внимание формулы (28), (29), из (25) получим уравнение первого приближения для колебаний давления:

$$\Lambda^2\frac{\partial^2\tilde{h}}{\partial\tilde{h}^2} - \Delta\tilde{h} = \widetilde{S}', \qquad (31)$$

где $\widetilde{S}' = -\Delta g$ – нестационарная часть функции S.

Для упрощения записи далее знак «˜» в формулах опускается, и везде, где это не оговорено особо, рассматриваются безразмерные переменные.

Решение уравнения (31) разделяется на две задачи: расчет нестационарного течения для модели несжимаемой среды, которое определяет возмущающую функцию, и решение неоднородного волнового уравнения относительно пульсаций давления h. Аналогичный подход используется, например, в работе [13].

Выражаем возмущающую функцию через поле скоростей несжимаемого течения из формулы:

$$S = \nabla\left(\vec{U}\nabla\vec{U}\right), \qquad (32)$$

$$S = \nabla\begin{vmatrix} U_x\frac{\partial U_x}{\partial x} & U_y\frac{\partial U_x}{\partial y} & U_z\frac{\partial U_x}{\partial z} \\ U_x\frac{\partial U_y}{\partial x} & U_y\frac{\partial U_y}{\partial y} & U_z\frac{\partial U_y}{\partial z} \\ U_x\frac{\partial U_z}{\partial x} & U_y\frac{\partial U_z}{\partial y} & U_z\frac{\partial U_z}{\partial z} \end{vmatrix}. \qquad (33)$$

После преобразований на основе соотношений векторной алгебры получаем:

$$S=\left(\frac{\partial U_x}{\partial x}\right)^2+U_x\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}+\frac{\partial U_y}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_x}{\partial y}+$$
$$+U_y\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\partial y}+\frac{\partial U_z}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_x}{\partial z}+U_z\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\partial z}+$$
$$+\frac{\partial Uy}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_x}{\partial y}+U_x\frac{\partial^2 U_y}{\partial x\partial y}+\left(\frac{\partial U_y}{\partial y}\right)^2+$$
$$+U_y\frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2}+\frac{\partial U_z}{\partial y}\cdot\frac{\partial U_y}{\partial z}+U_z\frac{\partial^2 U_y}{\partial z\partial y}+ \tag{34}$$
$$+\frac{\partial U_x}{\partial z}\cdot\frac{\partial U_z}{\partial x}+U_x\frac{\partial^2 U_z}{\partial x\partial z}+\frac{\partial U_y}{\partial z}\cdot\frac{\partial U_z}{\partial y}+$$
$$+U_y\frac{\partial^2 U_z}{\partial y\partial z}+\left(\frac{\partial U_z}{\partial z}\right)^2+U_z\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}.$$

Учитывая уравнение неразрывности для несжимаемой среды,

$$U_x\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2}+U_x\frac{\partial^2 U_y}{\partial x\partial y}+U_x\frac{\partial^2 U_z}{\partial x\partial z}=0;$$
$$U_y\frac{\partial^2 U_x}{\partial x\partial y}+U_y\frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2}+U_y\frac{\partial^2 U_z}{\partial y\partial z}=0; \tag{35}$$
$$U_z\frac{\partial^2 U_x}{\partial z\partial x}+U_z\frac{\partial^2 U_y}{\partial z\partial y}+U_z\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2}=0.$$

Окончательно получаем следующее выражение:

$$S=2\left(\frac{\partial U_y}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_x}{\partial y}+\frac{\partial U_z}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_x}{\partial z}+\frac{\partial U_z}{\partial y}\cdot\frac{\partial U_y}{\partial z}-\right.$$
$$\left.-\frac{\partial U_x}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_y}{\partial y}-\frac{\partial U_x}{\partial x}\cdot\frac{\partial U_z}{\partial z}-\frac{\partial U_y}{\partial y}\cdot\frac{\partial U_z}{\partial z}\right). \tag{36}$$

Запишем акустико-вихревое уравнение в декартовой системе координат:

$$\Lambda^2\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=S'. \tag{37}$$

Возмущающая функция в правой части уравнения представляет собой нестационарную часть функции S (36).

Конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений в декартовой системе координат получаются интегрированием акустико-волнового уравнения по пространству и времени с введением конечных объемов.

Все поле течения покрывается прямоугольной сеткой. Каждому узлу сетки ставится в соответствие три числа (i, j, k), которые определяют порядковый номер конечного объема (ячейки) на X-, Y- и Z-координатных осях. Границы между соседними ячейками проходят через середины шагов сетки.

Кроме того, введем временную сетку с верхним индексом (m) и равномерным шагом по времени Δt, в которой каждому моменту времени соответствует номер m так, что

$$t+\Delta t=(m+1)\Delta t. \tag{38}$$

Рассмотрим вывод конечно-разностных уравнений для внутренних узлов сетки (ячейка 1). Для уравнения (37) используем интегральный метод [14]. Проинтегрируем уравнение (37) по пространству и времени в пределах одной ячейки и одного шага по времени:

$$\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\int_{x_1}^{x_2}\int_{y_1}^{y_2}\int_{z_1}^{z_2}\left(\Lambda^2\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}-S'\right)\times \tag{39}$$
$$\times\partial t\partial x\partial y\partial z=0,$$

здесь для внутренней ячейки 1 пределы интегрирования по объему

$$x_1=x-\tfrac{1}{2}\Delta x,\ y_1=y-\tfrac{1}{2}\Delta y,$$
$$z_1=z-\tfrac{1}{2}\Delta z,\ x_2=x+\tfrac{1}{2}\Delta x, \tag{40}$$
$$y_2=y+\tfrac{1}{2}\Delta y,\ z_2=z-\tfrac{1}{2}\Delta z.$$

Будем считать, что давление, его вторая производная по времени и возмущающая функция постоянны внутри объема ячейки. Тогда можно записать для каждой гармоники ЧСЛ

$$\Lambda^2 l^2\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\frac{\partial^2 h}{\partial t^2}\partial t\int_{x_1}^{x_2}dx\int_{y_1}^{y_2}dy\int_{z_1}^{z_2}dz-$$
$$-\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\left(\int_{x_1}^{x_2}\int_{y_1}^{y_2}\int_{z_1}^{z_2}\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}-\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right)dx\,dy\,dz\right)dt- \tag{41}$$
$$-\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}S'\int_{x_1}^{x_2}dx\int_{y_1}^{y_2}dy\int_{z_1}^{z_2}dz=0.$$

С учетом формул для конечно-разностных аналогов производных

$$\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\frac{\partial^2 h}{\partial t}dt=\left.\frac{\partial h}{\partial t}\right|_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}=$$
$$=\frac{h_{ijk}^{m+1}-h_{ijk}^{m}}{\Delta t}-\frac{h_{ijk}^{m}-h_{ijk}^{m-1}}{\Delta t}= \tag{42}$$
$$=\frac{h_{ijk}^{m+1}-2h_{ijk}^{m}+h_{ijk}^{m-1}}{\Delta t},$$

и уравнение (41) преобразуется к виду

$$h_{ijk}^{m+1}=2h_{ijk}^{m}-2h_{ijk}^{m-1}+\frac{\Delta t}{\Lambda^2 l^2 V}\Psi_c, \tag{43}$$

где l – номер гармоники ЧСЛ; V – объем ячейки; функция Ψ_c (c – тип ячейки) определяется выражением

$$\Psi_c=\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\left[\int_{y_1}^{y_2}\int_{z_1}^{z_2}\left(\left.\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right|^{x_2}-\left.\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right|_{x_1}\right)dy\,dz\right]dt+$$
$$+\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\left[\int_{z_1}^{z_2}\int_{x_1}^{x_2}\left(\left.\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right|^{y_2}-\left.\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right|_{y_1}\right)dz\,dx\right]dt+$$

$$+\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}\left[\int_{y_1}^{y_2}\int_{x_1}^{x_2}\left(\left.\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right|^{z_2}-\left.\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right|_{z_1}\right)dy\,dx\right]dt+$$
$$+\int_{t-\frac{\Delta t}{2}}^{t+\frac{\Delta t}{2}}S'\partial t\int_{x_1}^{x_2}dx\int_{y_1}^{y_2}dy\int_{z_1}^{z_2}dz=0 \qquad (44)$$

и зависит от типа ячейки, так как x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2 различны для разных типов ячеек.

Для внутренних ячеек типа 1 (рис. 1)

$$\left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|^{x_1}=\frac{h^m_{i+1,j,k}-h^m_{i,j,k}}{\Delta x}\qquad \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x_2}=\frac{h^m_{i,j,k}-h^m_{i-1,j,k}}{\Delta x}. \qquad (45)$$

Например, для ячеек, находящихся на стенке, нормальной к оси X справа, получаем

$$\left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|^{x_1}=0\qquad \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x_2}=\frac{h^m_{i,j,k}-h^m_{i-1,j,k}}{\Delta x}, \qquad (46)$$

а для ячеек, находящихся на входной границе с нормалью n,

$$\left.\frac{\partial h}{\partial n}\right|^{n}=-\frac{l}{Z_l}\left(\frac{h^{m+1}-h^{m-1}}{2\Delta t}\right)+\frac{\partial g}{\partial n}+\frac{l}{Z_l}\frac{\partial g}{\partial t}. \qquad (47)$$

Таким образом, соответствующая производная от h по нормали к граничной поверхности определяется через производную по времени и удельный комплексный акустический импеданс Z_i на данной границе для соответствующей гармоники ЧСЛ. Производные от колебаний вихревой моды известны из решения для нестационарного течения несжимаемой вязкой среды.

Метод расчета вихревой моды. Расчет нестационарного течения в модели несжимаемой среды с использованием уравнения Навье–Стокса (48) и уравнения неразрывности (49) принят для первого шага акустико-вихревого метода:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t}+\nabla(\mathbf{V}\otimes\mathbf{V})=$$
$$=-\frac{\nabla P}{\rho}+\frac{1}{\rho}\nabla((\mu+\mu_t)(\nabla\mathbf{V}+(\nabla\mathbf{V})^T), \qquad (48)$$

$$\nabla\cdot\mathbf{V}=0. \qquad (49)$$

Эти уравнения дополнены уравнениями k-ε (турбулентная энергия – скорость диссипации) модели турбулентности. В данной модели турбулентности [15] турбулентная вязкость μ_t выражается через величины k и ε следующим образом:

$$\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon}. \qquad (50)$$

Уравнения для k и ε:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\nabla(\mathbf{V}k)=\frac{1}{\rho}\nabla\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right)+\frac{G}{\rho}-(\varepsilon-\varepsilon_{ini}), \qquad (51)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\nabla(\mathbf{V}\varepsilon)=\frac{1}{\rho}\nabla\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right)+$$
$$+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_1\frac{G}{\rho}-C_2(\varepsilon-\varepsilon_{ini})\right), \qquad (52)$$

где ε_{ini} – начальное значение турбулентной диссипации; через G обозначено выражение

$$G=\mu_{eff}\frac{\partial V_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j}+\frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right). \qquad (53)$$

Значения параметров k-ε-модели равны:

$$\sigma_k=1;\ \sigma_\varepsilon=1{,}3;\ C_\mu=0{,}09;\ C_1=1{,}44;\ C_2=1{,}92. \qquad (54)$$

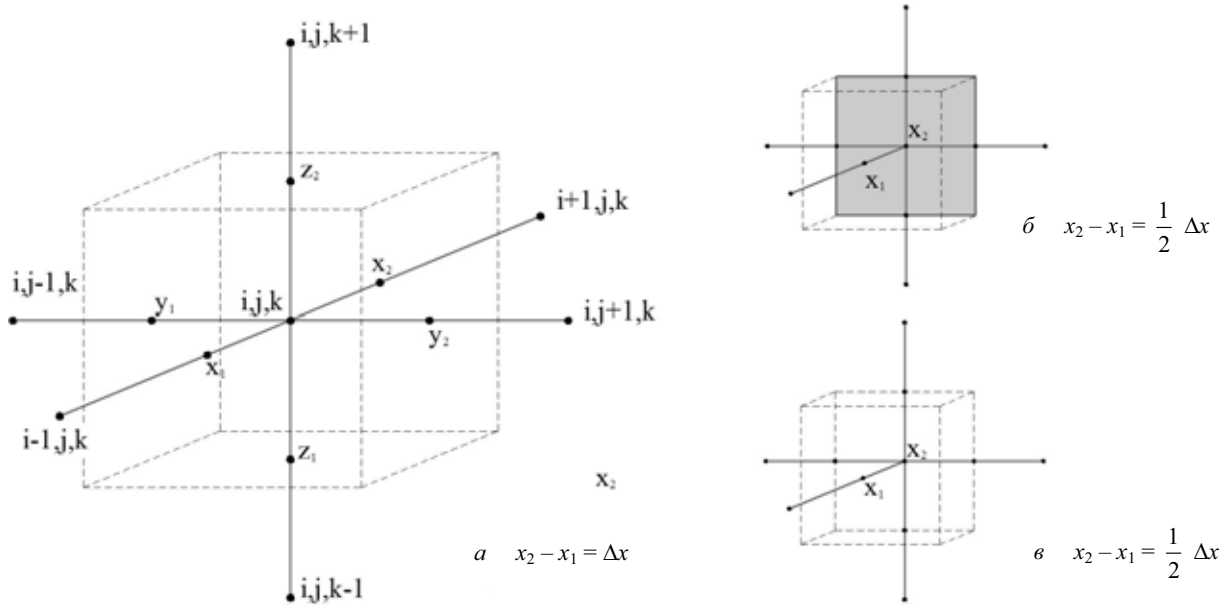


Рис. 1. Тип ячейки:
а – внутренняя; *б* – стенка; *в* – импедансная граница

Граничное условие для скорости жидкости в турбулентном течении на стенке задается с использованием численной аппроксимации логарифмического закона для тангенциальной компоненты скорости на стенке [16]. Численный метод реализован на прямоугольной сетке с локальной адаптацией и подсеточным разрешением сложной геометрии. Во всей расчетной области вводится прямоугольная сетка. Выделяются подобласти с особенностями геометрии или течения, в которых необходимо провести расчет на более мелкой, чем исходная, сетке. При этом расчетная ячейка, в которую попала выделяемая особенность, делится на 8 равных ячеек. Далее, если необходимо, ячейки делятся еще раз, и так до достижения необходимой точности. Ячейки начальной сетки называются ячейками уровня 0, ячейки, получаемые измельчением уровня 0, называются ячейками уровня 1 и т. д. При генерации сетки накладывается условие, что гранями и ребрами могут граничить друг с другом только ячейки с номерами уровней, отличающимися не более чем на единицу. Метод подсеточного разрешения геометрии предназначен для аппроксимации криволинейных границ на прямоугольной сетке, в том числе и свободной границы жидкости. Ячейки, через которые проходит граница, расщепляются на 2, 3 и т. д. ячеек. При этом они теряют свою первоначальную форму параллелепипеда и превращаются в многогранники произвольной формы. Уравнения математической модели аппроксимируются для этих многогранников без каких-либо упрощений. Такой подход обеспечивает точность расчетов в зоне высоких градиентов параметров нестационарного потока (в зоне взаимодействия лопаточных решеток), а также эффективное решение волнового акустико-вихревого уравнения, используя минимальные вычислительные ресурсы.

Геометрия проточной части и сетка. Для совмещения численных решений в роторе и статоре насоса применяется метод скользящих сеток. В этом случае вся область расчета разделяется на несколько подобластей, часть из которых решается во вращающейся системе отчета. Передача параметров потока из вращающейся в неподвижную область расчета производится через специальный интерфейс «скользящая поверхность», который обеспечивает интерполяцию параметров потока с учетом «виртуального» углового смещения сеток ротора и статора. В процессе решения акустико-вихревого волнового уравнения скользящие поверхности используются при постановке граничных импедансных условий для акустической моды пульсаций давления.

Обмен данными между ротором и неподвижными подобластями выполняется с помощью интерполяции на границе подобластей – на «скользящих» поверхностях. Для этого временной шаг итерационной процедуры выбирается так, чтобы в течение одной итерации взаимное смещение подобластей не превышало размеров ячейки конечно-разностной сетки в зоне скользящих поверхностей.

Расчетная область в математическом пространстве состоит из трех подобластей (рис. 2): подвода, ротора и статора, которые виртуально объединяются через скользящие поверхности, расположенные на входе и выходе шнекоцентробежного колеса и на ответных поверхностях подобластей подвода и статора.

Данная расчетная область покрывается начальной прямоугольной сеткой, которая адаптируется к особенностям геометрии (рис. 3), обеспечивая необходимую точность расчета.

Все три подобласти виртуально объединены по скользящим поверхностям. Таким образом, расчетная область адекватно отражает реальные условия течения рабочей жидкости, учитывая гидродинамическое взаимодействие всех элементов проточной части, включая направляющие ребра в подводе, вращающуюся лопаточную систему ротора с трехзаходным предвключенным шнеком и центробежным колесом, имеющим дополнительные укороченные лопатки (семь основных и семь дополнительных лопаток), а также двенадцатиканальный (трубчатый) направляющий аппарат.

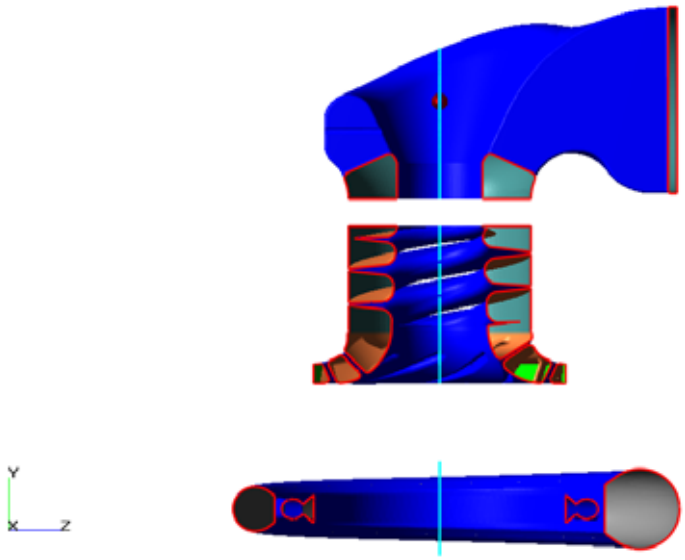


Рис. 2. Расчетная область

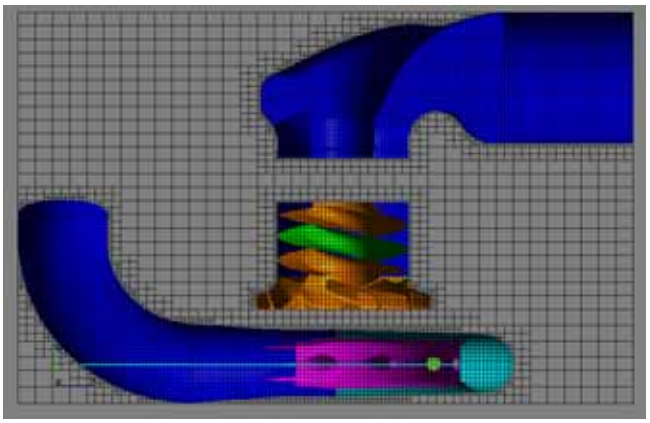


Рис. 3. Расчетная сетка второго уровня адаптации
в меридиональной проекции

Численное моделирование вихревой моды проводится нестационарным итерационным методом от нулевых начальных условий. Для выхода на стационарный (колебательный) режим течения в этом случае требуется обеспечить не менее шести полных оборотов центробежного колеса. Стационарный режим работы достигается для расчетной сетки при минимальной адаптации первого уровня с целью экономии процессорного времени и ресурсов. В качестве начальных условий в области жидкого объема задаются нулевые значения скорости и давления. Расчет ведется как процесс «раскрутки» насоса до достижения сходимости к периодическому осциллирующему решению. Как правило, шести–десяти полных оборотов рабочего колеса достаточно для получения периодического решения. Далее можно получить осреднением энергетические параметры насоса и сигналы и спектры пульсаций давления в разных точках проточной части направляющего аппарата. Сходимость численного решения контролируется по напору насоса.

Временной шаг нестационарного расчета составляет 0,00001 с. Процессорное время расчета одного полного оборота ротора составляет около 2 ч. Утечки в уплотнениях колеса и сброс утечки на входе рабочего колеса не моделировались. Граничное условие заданного расхода применено в выходном сечении насоса. Последнее обеспечило возможность моделирования обратных токов на входе шнека при малых подачах. Статическое давление в расчетах отчитывается от опорной величины 101000 Па. Во входном сечении расчетной области задано статическое давление.

Результаты численного моделирования. Проведено численное моделирование нестационарного течения в широком диапазоне изменения расхода относительно расчетного значения.

При снижении расхода наблюдается перестройка течения в проточной части насоса как в подводе, так и в отводящем устройстве. В подводе на режимах 0,65 и особенно 0,3 относительного расхода фиксируются обратные токи на входе в шнек. На режиме 0,3 относительного расхода обратные токи проникают глубоко вверх по потоку, несмотря на наличие разделительного направляющего ребра. Такой характер течения вызывает дополнительные нестационарные нагрузки на корпус насоса и ротор. Кроме того, обратные токи вызывают круговую неоднородность потока в роторе, что приводит к усилению генерации колебаний на роторной частоте и на комбинационных частотах.

Рассматривая основные тональные составляющие спектров в каналах направляющего аппарата, можно отметить, что существенное изменение амплитуды тональных компонент происходит при значениях относительного расхода 0,65–0,8, где при снижении расхода амплитуды основной лопаточной частоты и комбинационной гармоники на частоте 4 f_r резко возрастают. При дальнейшем снижении расхода и усилении интенсивности обратных токов амплитуды лопаточных частот и комбинационной гармоники снижаются. В расчетах используется относительная амплитуда, приведенная к произведению плотности рабочей жидкости на квадрат окружной скорости на внешнем диаметре центробежного колеса. В каналах направляющего аппарата относительная амплитуда первой гармоники ЧСЛ (7 f_r) на расчетном режиме составляет 0,0061. На рис. 4 показано изменение относительной амплитуды пульсаций давления первой гармоники ЧСЛ (7 f_r) при изменении расхода по результатам акустико-вихревого моделирования на выходе насоса. На расчетном режиме расчетная величина относительной амплитуды составляет 0,00083. Это в 7 раз ниже, чем в направляющем аппарате. Известный экспериментальный уровень амплитуды пульсаций давления на выходе составляет 0,002. Такое несоответствие может быть связано с резонансным увеличением колебаний в реальном трубопроводе, так как в расчете использовано граничное условие акустического импеданса бесконечно длинной трубы. При относительном расходе от 0,8 до 1,35 от расчетного наблюдается плавный рост амплитуды. В зоне расхода менее 0,8 амплитуда пульсаций на данной частоте ведет себя нестабильно. Есть тренд к увеличению амплитуды при снижении расхода до 0,3 от расчетного. Такая нестабильность расчетных величин амплитуды, очевидно, связана с недостаточным осреднением источниковой функции акустико-вихревого уравнения: определение источниковой функции производится в течение одного периода движения лопаточной решетки. При наличии возмущений более низких частот, что характерно для режимов с обратными токами, точность определения амплитуды источниковой функции снижается.

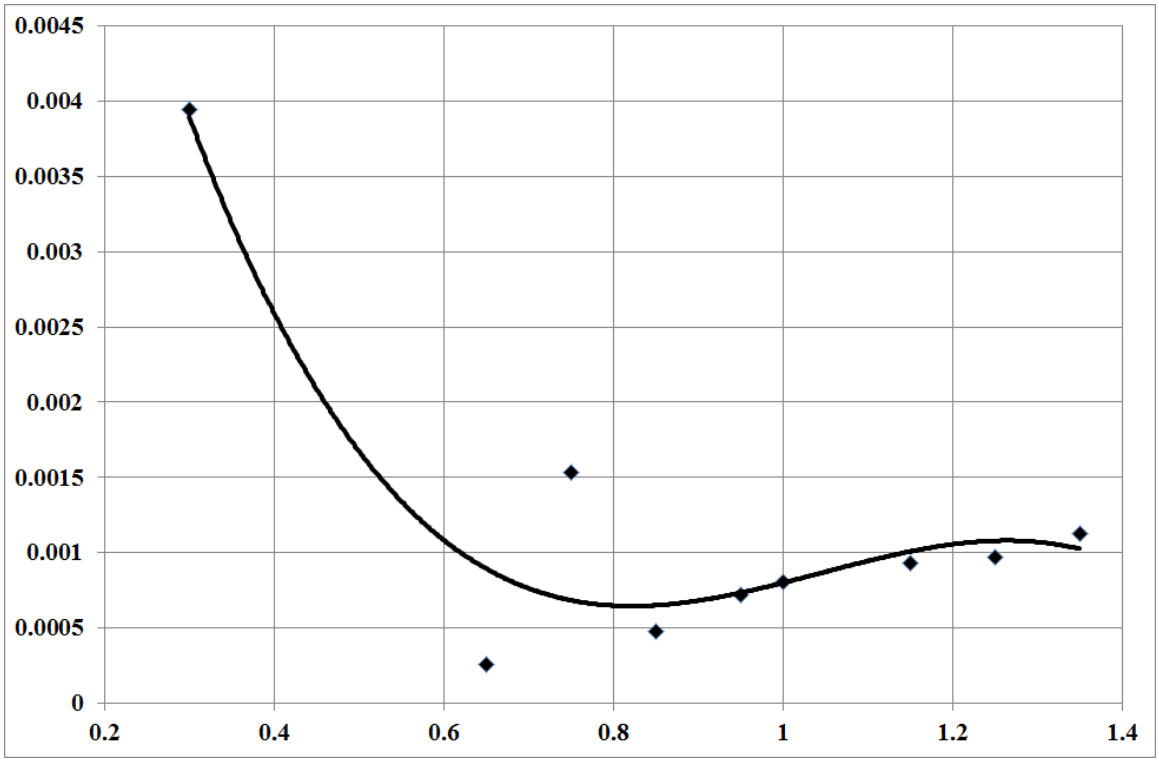


Рис. 4. Изменение относительной амплитуды пульсаций давления на первой гармонике ЧСЛ [Па] в зависимости от относительного расхода через насос

Заключение. Относительная амплитуда пульсаций давления ЧСЛ на выходе насоса (0,00083) в семь раз ниже, чем в каналах направляющего аппарата (0,0061). Значение амплитуды на выходе занижено по сравнению с известным экспериментальным уровнем амплитуды (0,002) вследствие влияния выходного акустического импеданса. При снижении относительного расхода до значений 0,65–0,8 амплитуда пульсаций давления ЧСЛ резко возрастает в направляющем аппарате и на выходе насоса.

Библиографические ссылки

1. Chen Y. N. Water – Pressure Oscillations in the Volute Casings of Storage Pumps // Sulzer Technical Review. 1961. Research number. P. 21–34.

2. Штруб Р. А. Колебания давления и усталостные напряжения в насосах и обратимых гидромашинах гидроаккумулирующих электростанций // Энергетические машины и установки. 1964. Т. 86, № 1. С. 117–121.

3. Покровский Б. В., Юдин Е. Я. Основные особенности шума и вибрации центробежных насосов // Акустический журнал. 1966. Т. XII, вып. 3. С. 355–364.

4. Guelich J. F., Bolleter U. Pressure Pulsations in Centrifugal Pumps // Transactions of the ASME : Journal of Vibration and Acoustics. 1992. Vol. 114. P. 272–279.

5. Юаса Т., Хината Т. Пульсации потока за центробежным колесом // Эхара Дзихо. 1980. № 114. 7 с. (перевод с яп. № Г-39508. М. : ВЦП, 1981).

6. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М. : Наука, 1981. 206 с.

7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М. : Гос. изд-во тех.-теорет. лит-ры, 1954. 795 с.

8. Артамонов К. И. Термогидроакустичекая устойчивость. М. : Машиностроение, 1982. 261 с.

9. Голдстэйн М. Е. Аэроакустика : пер с англ. М. : Машиностроение, 1981. 295 с.

10. Столяров Е. П. Возбуждение звука малыми возмущениями энтропии и завихренности в пространственно неоднородных течениях сжимаемого идеального газа // Акустика турбулентных потоков. М. : Наука, 1983. С. 3–14.

11. Тимушев С. Ф. Численное моделирование нестационарных гидродинамических процессов в центробежных насосах и вентиляторах с целью снижения их виброактивности и шума : дис. … д-ра техн. наук : 05.07.05. М., 1995. 145 с.

12. Crow S. C. Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem // *Studies in Applied Mathematics*. 1970. Vol. XLIX, No. 1. P. 41–46.

13. Witkowski N., Hueppe A., Kaltenbacher M. Comparison of compressible and incompressible CFD methods for the acoustic analysis of flow induced noise in confined flows // *NOVEM. 2015*. No. 49310. 9 p.

14. Baumeister K. J. Time-dependent difference theory for noise propogation in a two-dimensional duct // *AIAA Paper*. 1980. No. 80-0098. 7 p.

15. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc. 1994. 460 p.

16. Software package for gas and fluid flow simulation FlowVision. Version 2.5.0. Manual CAPVIDIA. Leuven, Belgium, 1999–2007. 284 p.

References

1. Chen Y. N. Water – Pressure Oscillations in the Volute Casings of Storage Pumps. *Sulzer Technical Review*, 1961, Research number, P. 21–34.

2. Shtrub P. A. [Pressure fluctuations and fatigue stress in pumps and reversible hydraulic machines of pumped storage power plants]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*, 1964, Vol. 86, No. 1, P. 117–121 (In Russ.).

3. Pokrovskii B. V., Yudin E. Ya. [General features of centrifugal pump noise and vibration] *Akusticheskii zhurnal*, 1966, Vol. XII, No. 3, P. 355–364 (In Russ.).

4. Guelich J. F., Bolleter U. Pressure Pulsations in Centrifugal Pumps. *Transactions of the ASME. Journal of Vibration and Acoustics*, April 1992, Vol. 114, P. 272–279.

5. Yuasa T., Khinata T. *Pul'satsii potoka za tsentrobezhnym kolesom*. [Ripple flow of a centrifugal wheel]. Ecas Dziho, 1980, No. 114 (Translated with Japan). Wr-39508. Moscow, VTsP Publ., 1981, 7 p. (In Russ.).

6. Blokhintsev D. I. *Akustika neodnorodnoi dvizhushcheisya sredy* [Acoustics of inhomogeneous moving medium]. Moscow, Nauka Publ, 1981, 206 p. (In Russ.).

7. Landau L. D., Lifshits E. M. *Mekhanika sploshnykh sred* [Mechanics of continuum]. Moscow, Gos. izd-vo tekh.-teoreticheskoy literatury Publ., 1954, 795 p. (In Russ.).

8. Artamonov K. I. *Termogidroakustichekaya ustoichivost'* [Thermo-hydro-acoustical stability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 261 p. (In Russ.).

9. Goldstein M. E. *Aeroakustika* (Aeroacoustics): translation from English. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 295 p. (In Russ.).

10. Stolyarov E. P. [Sound generation by small disturbances of entropy and vorticity in spacially uneven flows of ideal gas]. *Akustika turbulentnykh potokov*. Moscow, Nauka Publ, 1983, P. 3–14 (In Russ.).

11. Timushev S. F. *Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh gidrodinamicheskikh protsessov v tsentrobezhnykh nasosakh i ventilyatorakh s tsel'yu snizheniya ikh vibroaktivnosti i shuma. Diss. d-ra tekhn. nauk* [Numerical modeling of unsteady hydromechanics in centrifugal pumps and ventilators with the aim of noise and vibration reduction. *Dr. Tech. Sc. Thesis*]. Moscow, 1995, 145 p. (In Russ.).

12. Crow S. C. Aerodynamic Sound Emission as a Singular Perturbation Problem. *Studies in Applied Mathematics*, 1970, Vol. XLIX, No. 1, P. 41–46.

13. Witkowski N., Hueppe A., Kaltenbacher M. Comparison of compressible and incompressible CFD methods for the acoustic analysis of flow induced noise in confined flows., *NOVEM,* 2015, No. 49310, 9 p.

14. Baumeister K. J. Time-dependent difference theory for noise propogation in a two-dimensional duct. *AIAA Paper*, 1980, No 80-0098, 7 p.

15. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. *DCW Industries*, Inc. 1994, 460 p.

16. Software package for gas and fluid flow simulation FlowVision. Version 2.5.0. Manual CAPVIDIA, 1999-2007 Leuven, Belgium, 284 p.

© Тимушев С. Ф., Клименко Д. В., 2015

Раздел
Part
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS SCIENCE

УДК 678

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 918–923

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЧАСТИЧНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ СОЗДАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Ю. Власов*, К. А. Пасечник, В. А. Мартынов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660059, г. Красноярск, ул. Семафорная, 433/1
*E-mail: vlasov.anton@gmail.com

Рассмотрены вопросы создания формостабильных интегральных тонкостенных конструкций из полимерных композиционных материалов методом частичного отверждения связующего. Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями, предъявляемыми к конструкциям аэрокосмического назначения: увеличение прочности конструкции и снижение ее веса. Используя метод частичного отверждения, возможно создание интегральных конструкций с пониженным весом за счет отсутствия механических креплений, с высокой прочностью, жесткостью и размеростабильностью, ввиду отсутствия дополнительных материалов, помимо материала матрицы и армирующего наполнителя, что позволяет добиться принципа непрерывности конечного материала. Дополнительным преимуществом приема частичного отверждения является возможность формования конструкции за один технологический цикл.

Описано актуальное состояние технологии производства изделий методом частичного отверждения, выделены результаты исследовательских предшествующих работ. Проведен анализ стадии отверждения полимерного связующего горячего отверждения. Определены оптимальные параметры режима отверждения связующего, учитывающего задачу обеспечения максимальной адгезии между деталями интегральной конструкции и минимального времени цикла для решения вопроса организации серийного изготовления.

Кроме того, рассмотрена возможная конструкция технологической оснастки, пригодной для изготовления деталей методом трансферного формования с использованием приема частичного отверждения связующего в различных зонах тонкостенных оболочечных конструкций. Рассмотрена конструкция теплообменника для осуществления отвода тепла из зон с требуемым частичным отверждением. Проведен тепловой расчет различных конструкций теплообменников, показана теоретическая эффективность выбранной схемы.

Показаны пути оценки эффективности разрабатываемой технологии на основе проведения прочностных и теплофизических испытаний.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении прецизионных размеростабильных изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов аэрокосмического назначения.

Ключевые слова: интегральные конструкции, полимерные композиционные материалы, частичное отверждение связующего.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 918–923

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF PARTIAL SOLIDIFICATION OF THIN-WALLED SHELLS WHEN CREATING DESIGNS FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

A. Yu. Vlasov*, K. A. Pasechnik, V. A. Martynov

Reshetnev Siberian State Aerospace University
433/1, Semafornaya Str., Krasnoyarsk, 660059, Russian Federation,
*E-mail: vlasov.anton@gmail.com

The article focuses on the creation of dimensionally stable integrated thin-walled structures made of polymer composite materials by the binder partially cross-linking. The relevance of the work lies in the increased requirements for aerospace structures: an increase in structural strength and reduce its weight. A partial cross-linking method allows you to create integrated design with a low weight due to lack of mechanical fasteners. The partial cross-linking method allows you to create integrated design with high strength, stiffness and dimensional stability due to lack of additional materials besides matrix and reinforcement. It allows to get the principle of continuity of the final material. The additional advantage of the partial cross-linking method is molding structure in one process cycle. This article describes the current state of the partial cross-linking manufacturing technology and research results identified previous work. We analyzed the curing step of the hot temperature polymer binder and determined optimal parameters of cure for

solve the problem about maximum adhesion between two part of integrated structure and minimal cycle time for organize of serial production. In this article we have shown a mold construction for production composite material by RTM with the partial cross-linking method and heat exchanger construction to heat extraction from partial cross-linking area. We conducted a thermal design for different heat exchanger construction and we chose the best construction for this case. We produced the mold for resin transfer molding and we get a sample of material with partial cross-linked area.

Keywords: integrated design, polymer composites, partial cross-linking.

Введение. Детали из полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются основными элементами при создании конструкций с высокими удельными характеристиками прочности, жесткости для различных объектов авиационной и космической техники. Перспективным направлением использования ПКМ является создание интегральных конструкций. Составные части таких конструкций могут быть соединены механическими устройствами или при помощи склеивания. Механическое крепление предусматривает необходимость выполнения отверстий в композитном материале, являющихся дополнительными концентраторами напряжений. Помимо этого, контакт металлического крепежа и углеродных волокон приводит к коррозии металла и, как следствие, к необходимости использования изолирующих слоев или материалов с высоким стандартным электродным потенциалом.

На данный момент в космической технике сборка интегральных конструкций чаще всего осуществляется склейкой с помощью адгезивов. Метод относительно прост и не требует значительных затрат, однако при соединении субстрата и адгезива происходит ряд физико-химических процессов, вносящих свой вклад в механические свойства всей конструкции. Известно, что существуют различные механизмы адгезии между субстратом и адгезивом, определяющиеся как межмолекулярными взаимодействиями, так и химическими связями. Образующиеся при межмолекулярном взаимодействии связи имеют низкую прочность и легко разрушаются под влиянием внешних факторов. Химические связи в сотни раз прочнее, однако их образование и проявление максимальных возможностей требуют создания благоприятных условий. Материалы субстрата и адгезива должны иметь близкую молекулярную природу для возникновения диффузии между ними. Также адгезив должен обладать высокой текучестью и обладать смачивающей способностью по отношению к поверхности субстрата. Кроме того, при проведении операций традиционной склейки поверхность субстрата должна быть обработана, однако и в этом случае наблюдается сорбция поверхностью пыли, влаги и других загрязнений [1; 2].

Постановка задачи. При создании интегральных конструкций из полимерных композитных материалов наиболее перспективны методы, использующие метод частичного отверждения связующего [3; 4]. Разработками подобных способов занимается компания Aerotec, дочернее предприятие Airbus Group [5]. Метод заключается в изготовлении деталей изделия с различной степенью отверждения полимерной матрицы композиционного материала с возможным контролем степени отверждения с помощью диэлектрических сенсоров. Различие в степени отверждения полимерной матрицы достигается контролируемым охлаждением определенных зон детали (тонкостенной оболочки), которые в дальнейшем будут соединены с неотвержденными зонами другой детали (подкрепляющими элементами – ребрами жесткости). Таким образом, склеивание и температурная обработка элементов конструкции происходит непосредственно в технологической оснастке. В связи с этим при изготовлении прецизионных формостабильных конструкций не требуется проведение дополнительных операций по склейке и обработке деталей, а получаемое таким образом клеевое соединение остается не менее прочным и долговечным, чем само изделие.

Производство изделий из ПКМ с использованием частичного отверждения связующего является достаточно сложным, требующим обеспечения определенных параметров техпроцесса и жесткого контроля значений этих параметров. Известны современные исследования, направленные на определение оптимальных режимов склеивания деталей из ПКМ, основанные на различных степенях отверждения путем измерений с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [6; 7]. Существует метод диэлектрического анализа, позволяющий проводить мониторинг процесса отверждения непосредственно при изготовлении детали [8–10]. Актуальной задачей является определение оптимальных режимов отверждения связующего и строгое их соответствие требуемой температуре нагрева в различных зонах технологической оснастки для получения зон с различной степенью отверждения.

Физические процессы и технологические решения. В ходе выполнения работы было установлено, что для производства формостабильных конструкций сложной формы необходимо использовать связующие, имеющие в отвержденном состоянии определенный набор конечных свойств, таких как низкий коэффициент термического расширения, низкая адсорбция влаги, высокая температура тепловой деформации, минимальное содержание микротрещин, высокие прочностные характеристики и др. К таким связующим в большей степени относятся цианатэфирные связующие (например, TenCate, EX-1510) и некоторые связующие на эпоксидной основе (например, Hexcel, RTM-6).

Процесс производства изделий из ПКМ, в частности методом RTM (трансферное формование), подразделяется на различные подпроцессы, каждый параметр которых необходимо определять и контролировать для построения системы адаптивного управления процессом [11–15]. В данной работе основным

рассматриваемым подпроцессом является процесс отверждения связующего. Процесс характеризуется функциональным входным параметром, количественно характеризующим процесс отверждения – динамикой изменения ионной вязкости полимерной матрицы в процессе отверждения. Ионная вязкость (обратная величина ионной проводимости) определяется из диэлектрических характеристик связующего – диэлектрической проницаемости, диэлектрического фактора потерь и продолжительности процесса отверждения. По мере протекания химической реакции отверждения (увеличение степени сшивки макромолекул) происходит уменьшение сегментальной подвижности звеньев макромолекул и, как следствие, уменьшение подвижности ионов примесей, которые в случае жидкого состояния связующего ориентировались по направлению приложенного электрического поля относительно свободно. Таким образом, по мере отверждения связующего происходит увеличение ионной вязкости (уменьшение ионной проводимости).

При реализации частичного отверждения после завершения этапа пропитки важно установить оптимальные режимы отверждения полимерного материала. С точки зрения обеспечения максимальной монолитности интегральной конструкции и минимального времени цикла необходимо, чтобы та часть связующего, которая находится вне зоны охлаждения, отверждалась по выбранному режиму выше точки гелеобразования, а охлаждаемая часть за эту точку не переходила. При таком условии на этапе склейки интегральных конструкций возможно осуществление не только физико-механического взаимодействия «субстрат–адгезив», но и максимально возможного химического сцепления между молекулами связующего.

Известно, что после стадии гелеобразования процесс формирования разветвленной цепи полимера носит диффузионный характер, поэтому скорость процесса после гель-точки резко замедляется и сводится к минимуму. Как видно из графика (рис. 1, участок 1), полученного с помощью диэлектрического анализатора и отражающего кинетику отверждения связующего, на первоначальном этапе повышения температуры происходит уменьшение как ионной вязкости, так и динамической, определенной с помощью вискозиметра Брукфильда (рис. 2), вызванное доминирующим характером теплового движения молекул связующего. На этом этапе основной вклад в диэлектрические характеристики вносят ионы, свободно ориентирующиеся под действием электрического поля диэлектрического сенсора, в связи с этим этот участок характеризуется также увеличением ионной проводимости. Этап 2 на рис. 1 соответствует равновесию воздействия сил теплового движения молекул и скорости роста макроцепи на диэлектрические характеристики. Участок 3 отражает образование достаточного количества связей и длины макромолекул для ограничения собственной подвижности и подвижности ионов. Сами же макромолекулы под действием теплового поля при завершении процесса обладают лишь сегментальной подвижностью. В этом случае при воздействии электрического поля происходит поляризация диэлектрика.

В качестве термореактивной матрицы для ПКМ было выбрано эпоксидное связующее горячего отверждения. За точку гелеобразования на графике изменения ионной вязкости принимается точка максимальной скорости приращения функции, определяемая производной $dlg\upsilon/\ dt$ [16]. Таким образом, время гелеобразования для системы Araldite LY 8615/Aradur 8615 составляет 56 мин при скорости нагрева 1 °С/мин. В качестве подтверждения этой величины приведен график динамической вязкости (рис. 2).

Стоит отметить участок 4 на рис. 1, отражающий возможность значительного увеличения степени отверждения связующего при температуре 180 °С, которая позволяет осуществить прием сборки интегральной конструкции методом частичного отверждения.

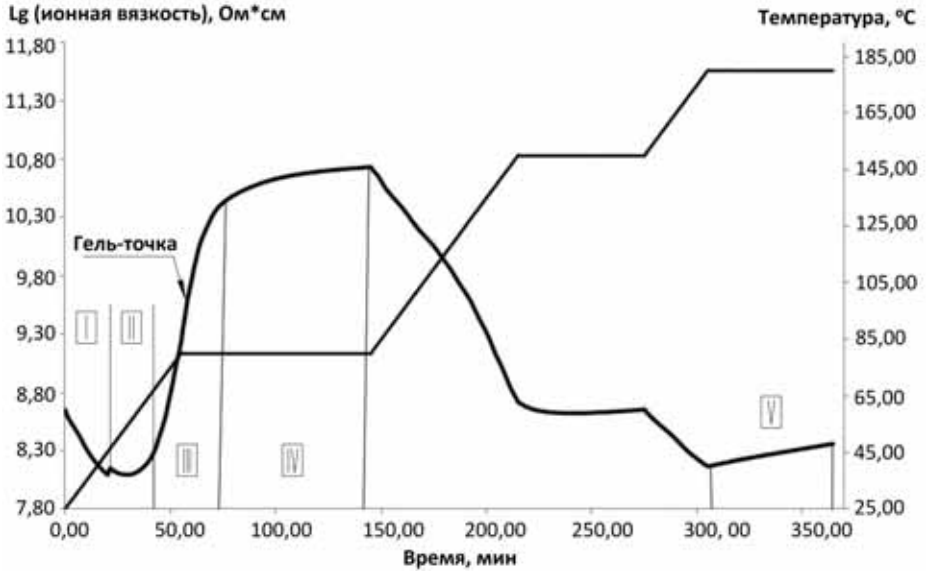


Рис. 1. Кинетика процесса отверждения связующего горячего отверждения

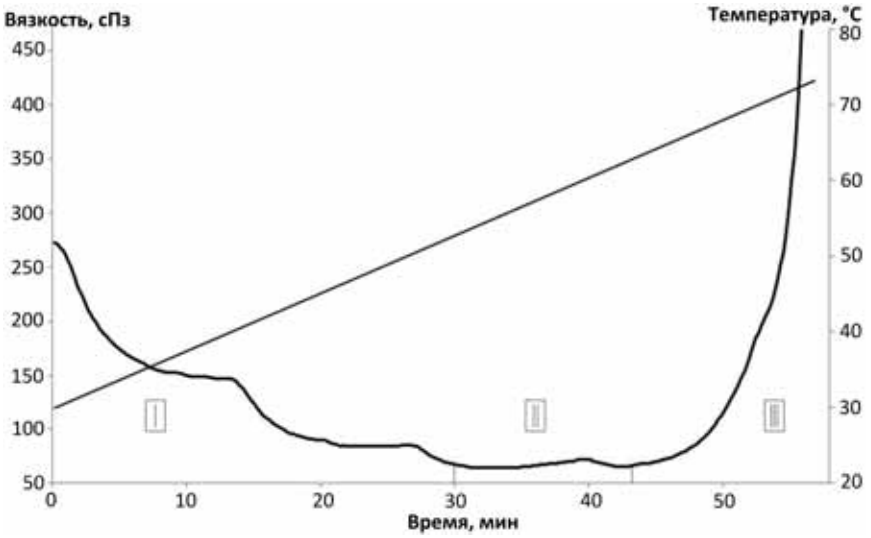


Рис. 2. Кинетика отверждения связующего горячего отверждения до точки гелеобразования

Такие входные параметры (режимы переработки) формируют определенные требования к технологическому оснащению процесса производства. В первую очередь это касается параметров технологической оснастки. При разработке оснастки для изготовления изделий с зонами различной степени отверждения необходимо решение нескольких задач. В зависимости от выбранного материала (связующего) и его технологических свойств конструкторские решения могут быть различными.

Во-первых, необходимо определить конструкцию теплообменника, во-вторых, знать распределение температур внутри изделия, чтобы понимать степень отверждения слоев, расположенных вблизи с теплообменником. В-третьих, необходимо выбрать изоляторы, работающие при режимах температурной обработки связующего и удовлетворяющие требованиям поставленной задачи, а также характеристикам холодильной машины.

Также для управления техпроцессом необходимо обеспечить непосредственный контакт диэлектрических датчиков со связующим материалом. Мониторинг за процессом отверждения всего изделия возможен лишь в том случае, если диэлектрические датчики будут размещены по всей исследуемой поверхности изделия.

В данной работе при выборе конструкции теплообменника было проведено моделирование различных конструкций. Рассматривались конструкции с охлаждением поверхности посредством радиатора с трубками и щелевого теплообменника. По предварительным расчетам установлено, что радиатор с трубками не способен обеспечить необходимые температуры на поверхности изделия.

Наиболее оправданным является решение, при котором конфигурация теплообменника соответствует форме и расположению зон с различной степенью отверждения. Схема технологической оснастки представлена на рис. 3. Теплообменник состоит из двух частей: радиатора и крышки. На обеих частях имеются ребра шириной 1 мм, ширина канала между ребрами – 1,4 мм. Соответственно, ширина каждого теплообменного канала составляет 0,2 мм. Высота канала – 10 мм. Расстояние от дна канала до следящей поверхности – 2 мм. Расхождение между шириной каналов не превышало 0,003 мм. Теплообменник был изготовлен из алюминиевого сплава с коэффициентом теплопроводности не менее 150 Вт/(м·К).

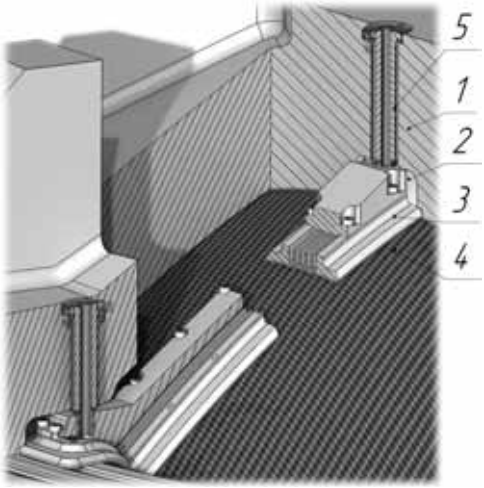


Рис. 3. Разрез технологической оснастки для реализации технологии частичного отверждения полимерной матрицы: *1* – технологическая оснастка (пуансон); *2* – теплоизоляционный кожух теплообменника; *3* – канально-щелевой теплообменник; *4* – формуемое изделие; *5* – входной/выходной коллектор теплообменника

Для анализа распределения температуры внутри изделия проведено моделирование процесса охлаждения (рис. 4). Было установлено, что исполнение закладного элемента с теплоизолирующим материалом позволяет существенно снизить распределение температур по поверхности оснастки, тем самым изолируя охлаждаемый контур и поддерживая определенную температуру внутри этого контура. Установлено, что коэффициент теплопроводности изоляционного материала должен быть в промежутке от 0,035–0,08 Вт/(м·К).

При испытаниях технологической оснастки установлено, что колебания температуры по контуру охлаждения составляют от 11 до 13 °С. Измерение проводилось с использованием ИК-камеры FLIR A615 SC. Температура остальных поверхностей оснастки остается в пределах 22–23 °С. Таким образом, экспериментально установлено, что при выбранных входных параметрах связующего изготовленный теплообменник с теплоизолирующим кожухом пригоден для изготовления изделий с зонами различной степени отверждения.

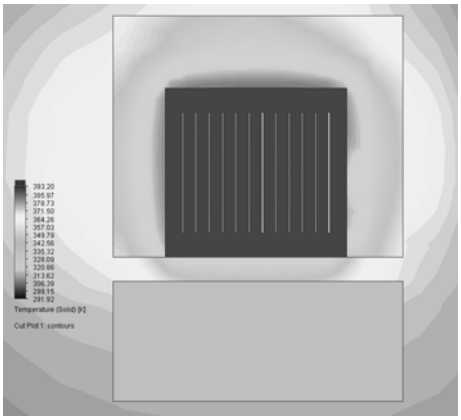


Рис. 4. Распределение температуры в изделии

Для апробации метода сборки интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью частичного отверждения связующего был проведен эксперимент с использованием связующего горячего отверждения. В технологическую оснастку с полостью размером 250×250×1 мм согласно схеме армирования укладывалась углеткань Porcher, артикул 3198. После осуществления пропитки армирующего пакета проводился равномерный нагрев связующего вне зоны охлаждающего контура до точки гелеобразования. К охлаждающему контуру технологической оснастки в течение времени ее нагрева осуществлялся непрерывный подвод охлаждающего агента. В результате был получен образец материала, представленный на рис. 5, с различной степенью отверждения, пригодный для сборки по зонам частичного отверждения.

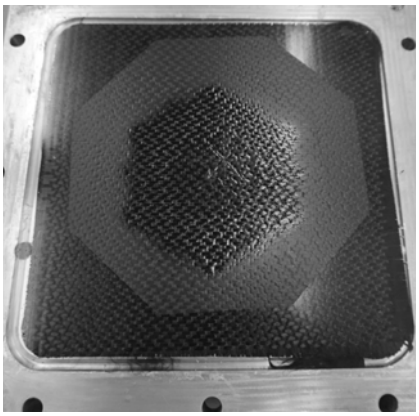


Рис. 5. Образец материала
с зонами различной степени отверждения

Задачи дальнейших исследований. Исходя из сходного назначения двух упомянутых технологических приемов склейки, необходимо провести сравнение прочностных и теплофизических характеристик деталей, собранных двумя методами: традиционная склейка и при помощи частичного отверждения связующего. Следующим этапом выполнения работы в рамках исследования способа частичного отверждения и нахождения оптимальных условий применения будет являться измерение силы адгезии и теплофизических характеристик полученного материала. В свою очередь, силы адгезии могут быть измерены работой разрыва при сдвиге двух склеенных внахлест углепластиковых пластин с размером площади склейки 12,5×10 мм и толщиной адгезива 0,3 мм.

Помимо испытаний на сдвиг, необходимо провести испытания на определение теплопроводности клеевого соединения.

На основе полученных результатов испытаний можно судить о тенденции в поведении конструкции при действии факторов космического пространства, о повышении размеростабильности и надежности изготавливаемого по технологии частичного отверждения изделия. Сравнительно лучший результат при сдвиге и теплопроводности пластин, соединенных методом частичного отверждения, будет свидетельствовать о более равномерном нагреве конечного изделия под действием температуры, минимизации образования локальных напряжений, сохранении своей формы и размеров.

В этом случае использование метода частичного отверждения будет более эффективным, чем метод традиционного склеивания.

Заключение. В данной работе отражены основные положения, необходимые для проектирования процессов производства изделий методом частичного отверждения, проведён анализ кинетики полимеризации эпоксидной системы Araldite LY 8615/Aradur 8615, разработана и изготовлена технологическая оснастка, позволяющая производить изделия из ПКМ с использованием метода частичного отверждения. Экспериментально установлено, что при обеспечении параметров техпроцесса возможно изготовление изделий с зонами различной степени отверждения.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, № 02.G25.31.0043.

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russian Federation, № 02.G25.31.0043.

Библиографические ссылки

1. Influence of partial cross-linking degree on basic physical properties of RTM6 epoxy resin / J. Moosburger-Will [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. 2013. Vol. 130. I.6. P. 4338–4346.

2. Поциус А. Клеи, адгезия, технология склеивания. СПб. : Профессия, 2007. 373 с.

3. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: конечно-элементное моделирование конструкции /

А. В. Лопатин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 73–78.

4. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Исследование процесса отверждения полимерных связующих на основе анализа их диэлектрических параметров при создании тонкостенных формостабильных конструкций, устойчивых к негативным факторам космического пространства // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 197–201.

5. Method for manufacturing fiber composite component, particularly structural component for vehicle, involves providing primary structure by partial curing of fiber material infiltered with matrix material : пат. DE 102011010384 A1 Германия: N DE 102011010384 B 4. Заявл. 05.02.11; опубл. 09.08.12.

6. Joining of carbon fiber reinforced polymer laminates by a novel partial cross-linking process / J. Moosburger-Will [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. 2015. Vol. 132. P. I.27.

7. Moosburger-Will J., Greisel M., Horn S. Physical aging of partially crosslinked RTM6 epoxy resin // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131. I.23.

8. Система мониторинга течения и отверждения связующего DIAMon Plus [Electronic resource]. URL: http://cct-kai.com/index.php/ru/struktura-tsentra/lab-compositn-konstrucs-ru/transfernoe-formovanie-ru/diamonplus-inasco-ru (дата обращения: 25.05.2015).

9. Reed W. F., Alb A. M. Monitoring from polymerization reactions: Fundamentals to applications. Wiley, 2013. 488 p.

10. Senturia S. D., Sheppard N. F. Dielectric analysis of thermoset cure // Advance in polymer science. 1986. Vol. 80. P. 1–47.

11. Kruckenberg T., Paton R. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures. Springer, 1999. 522 p.

12. Characterization of the resin transfer moulding process / K. N. Kendall [et al.] // Composites Manufacturing. 1992. Vol. 3, № 4. P. 235–249.

13. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Определение диапазонов изменения ключевых параметров, обеспечивающих стабильность технологического процесса производства изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов методом RTM // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 202–208.

14. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе / В. Б. Литвинов [и др.] // Материаловедение. 2011. № 7. С. 15–20.

15. Власов А. Ю., Филенкова Н. В., Кравчук Д. В. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: система адаптивного управления технологическим процессом // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 166–168.

16. Microdielectric study of epoxy-amine systems: Gelation and relationships between conductivity and kinetics / J. P. Elandou [et al.] // Die Angewandte Makromolekulare Chemie. 1999. Vol. 263, № 1. P. 57–70.

References

1. Moosburger-Will J. Influence of partial cross-linking degree on basic physical properties of RTM6 epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, Vol.130, P. 4338–4346.

2. Pocius A. *Klei, adgezivy, tekhnologiya skleivaniya* [Adhesion and adhesives technology]. Saint Petersburg, Professiya, 2007, 373 p.

3. Lopatin A. V. [Development of composite precision satellite reflector: finite element construction modeling]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 3(49), P. 73–78 (In Russ.).

4. Vlasov A. Yu. [et al.]. [Investigation of the curing process of the polymeric binder based on their dielectric parameters when creating a dimensionally stable thin-walled structures resistance to the negative space factors]. *Vestnik SibGAU.* 2014, Vol. 4(56), P. 197–201 (In Russ.).

5. Horn Siegfried. Method for manufacturing fiber composite component, particularly structural component for vehicle, involves providing primary structure by partial curing of fiber material infiltered with matrix material. Patent DE, No. DE102011010384 A1, 2012.

6. Moosburger-Will J. Joining of carbon fiber reinforced polymer laminates by a novel partial cross-linking process, *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, Vol. 132, P. I.27.

7. Moosburger-Will J. Physical aging of partially crosslinked RTM6 epoxy resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, Vol. 131, P. I.23.

8. *Sistema monitoringa techeniya i otverzhdeniya svyazuyushego DIAMon Plus* [The system of monitoring the flow and curing the binder DIAMon Plus]. (In Russ). Available at: http://cct-kai.com/index.php/ru/struktura-tsentra/lab-compositn-konstrucs-ru/transfernoe-formovanie-ru/diamonplus-inasco-ru (accessed 25.05.2015).

9. Reed W. F., Alb A. M. Monitoring from polymerization reactions: Fundamentals to applications. Wiley, 2013, 488 p.

10. Senturia S. D., Sheppard N. F. Dielectric analysis of thermoset cure. *Advance in polymer science.* 1986, Vol. 80, P. 1–47.

11. Kruckenberg T., Paton R. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures. Springer, 1999, 522 p.

12. Kendall K. N., Rudd C. D., Owen M. J. Characterization of the resin transfer moulding process. *Composites Manufacturing*. 1992, Vol. 3, P. 235–249.

13. Vlasov A. Yu. [et al.]. [Determination of the range of changes in key parameters, ensuring stability production process of complex shapes of polymer composites by method RTM]. *Vestnik SibGAU,* 2014, Vol. 4(56), P. 202–208 (In Russ.).

14. Litvinov V. B. [Epoxy binder curing kinetics and microstructure of the polymer matrix in CFRP]. *Materialovedenie*, 2011, Vol. 7, P. 15–20 (In Russ.).

15. Vlasov A. Yu. [et al.]. [Development of the precision satellite reflectors of polymeric composite materials: adaptive control system of manufacturing process]. *Vestnik SibGAU,* 2013, Vol. 3 (49), P. 166–168 (In Russ.).

16. Elandou J. P., Gerard J. F., Pascault J. P. Microdielectric study of epoxy-amine systems: Gelation and relationships between conductivity and kinetics. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1999, Vol. 263, P. 57–70.

© Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А., 2015

УДК 621

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 924–928

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ УДАЛЕННЫЕ УСТРОЙСТВА СВЯЗИ С ОБЪЕКТОМ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

П. М. Гофман[1], В. В. Колесник[2], Д. И. Ковалев[3], В. В. Брезицкая[3], К. К. Першакова[3]

[1]Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82
[2]Филиал ПАО «ОГК-2» – Красноярская ГРЭС-2
Российская Федерация, 663690, г. Зеленогорск
[3]Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

Рассматриваются возможности применения отечественных удаленных модулей устройств связи с объектом (УСО) распределенных автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) для ответственных применений тепловых электростанций большой и средней мощности с точки зрения политики импортозамещения, являющейся одной из важнейших задач, поставленных Правительством Российской Федерации перед разработчиками и производителями оборудования для отечественной промышленности и энергетики. Рассмотрены основные нормативно-технические документы (национальные стандарты, стандарты организаций и руководящие документы), определяющие требования к подсистемам технологических защит и защитных блокировок АСУ ТП тепловых электростанций. Выполнено исследование рынка отечественных разработчиков и производителей удаленных модулей УСО с возможностью использования их в подсистемах сбора и первичной обработки информации распределенных АСУ ТП для ответственных применений. Проведен сравнительный анализ основных технических характеристик. Рассмотрено соответствие отечественных удаленных модулей УСО в подсистемах технологических защит и защитных блокировок АСУ ТП тепловых электростанций большой и средней мощности нормативным документам, регламентирующим построение и состав таких систем с учетом требований надзорных органов (в частности, Ростехнадзора), с точки зрения применения на объектах, им подконтрольных. Проведена параллель возможности использования удаленных модулей УСО, производимых отечественными компаниями, наряду с зарубежными аналогами, а также преимущества перед ними в части технической поддержки и российских условий эксплуатации.

Ключевые слова: технологический процесс, автоматизированная система управления, удаленный модуль, устройство связи с объектом.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 924–928

DOMESTIC REMOTE DEVICES FOR COMMUNICATION WITH AN OBJECT FOR DISTRIBUTED AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS

P. M. Gofman[1], V. V. Kolesnik[2], D. I. Kovalev[3], V. V. Brezitskaya[3], Ch. K. Pershakova[3]

[1]Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
[2]Branch of PAO “OGK-2” – Krasnoyarskaya GRES-2
Zelenogorsk, 663690, Russian Federation
[3]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: kovalev.fsu@mail.ru

This article examines the possibility of applying domestic public remote modules of communication devices with the object (USO) distributed automati-lizirovania systems of control of technological process (ACS TP) for a responsible governmental applications of thermal power plants of low and medium capacities from the point of view of the import substitution policy which is one of the most important objectives of the Government of the Russian Federation for developers and manufacturers of equipment for domestic industry and energy the main normative-technical documents (national standards, standards organizations, and guidance documents) that define the requirements for subsystems of

technological protections and protection of locks APCS in thermal power plants are described. The market research of the Russian public developers and manufacturers of remote input / output modules with the possibility of use them in the subsystems of collection and primary processing of information distributed automated process control systems for critical applications is performed. A comparative analysis of the main technical characteristics has been conducted. The compliance of the national remote input / output modules in the sub systems of technological protection and protective interlocks APCS thermal power plants of low and medium capacities of regulatory documents, reglamentary appropriate construction and composition of such systems taking into account regulatory requirements (in particular RTN) from the point of view of application objects controlled by him have been reviewed. The parallel of the possibility of using remote input / output modules, produced by domestic-owned companies, along with foreign counterparts, as well as advantages over them in terms of technical support and Russian operating conditions has been done.

Keywords: technological process, automated control system, the remote module, the communication device with the object.

Введение. Методология построения АСУ ТП для особо ответственных применений уверенно развивается в сторону построения распределенных АСУ ТП как альтернативы централизованным, чему способствует стремительное удешевление и увеличение вычислительной мощности микропроцессоров, лежащих в основе автономных вычислителей в каждом из узлов АСУ ТП, расположенных в непосредственной близости от исполнительных устройств и первичных преобразователей.

Появление распределенных АСУ ТП для так называемых особо ответственных применений породило необходимость разработки специальных сетевых решений, ориентированных на эксплуатацию в сложных условиях работы ТЭС. Основными требованиями к таким системам являются высокая помехозащищенность и надежность, достаточная скорость передачи данных и низкая стоимость кабельной продукции.

Анализ удаленных модулей УСО подсистем сбора и первичной обработки информации для особо ответственных применений. Подсистемы технологических защит и защитных блокировок (ТЗиЗБ) являются одной из важнейших подсистем АСУ ТП тепловых электростанций (ТЭС) средней и большой мощности. Она обеспечивает защиту персонала и теплоэнергетического оборудования в случае возникновения аварийной или предаварийной ситуации путем экстренного автоматического перевода защищаемого оборудования в безопасное состояние. Требования, регламентирующие построение подсистем ТЗиЗБ, стоят на одной линейке с требованиями международных стандартов по построению H-F-систем, т. е. систем с повышенной надежностью. В Российской Федерации разработан национальный стандарт ГОСТ Р МЭК 61508–2007 (2014) [1], определяющий требования функциональной безопасности систем (электрических, электронных, электронных программируемых), связанных с безопасностью. Соответственно, к АСУ ТП ТЭС, реализующим функции подсистемы ТЗиЗБ, предъявляются те же требования, что и к АСУ ТП особо ответственных применений.

Одной из важнейших задач в распределенных АСУ ТП является сбор и первичная обработка информации о технологическом процессе (объекте) для ввода ее в импульсную часть подсистемы ТЗиЗБ. Ее решение обеспечивают удаленные устройства связи с объектом (так называемые удаленные модули УСО).

Для оценки возможностей использования отечественных модулей удаленных УСО в АСУ ТП ТЭС для особо ответственных применений обратимся к нормативным документам, регламентирующим разработку и построение подсистем ТЗиЗБ, выполненных на базе микропроцессорной техники, для тепловых электростанций.

На сегодняшний день основными документами являются: 1) «Технические требования к подсистеме технологических защит, выполненных на базе микропроцессорной техники», РД 153-34.1-35.137-00, разработанные коллективом инжиниринговой фирмы «ОРГРЭС» и введенные в 2000 году; 2) «Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТЭС, условия создания, нормы и требования», СТО 70238424.27.100.010–2011, разработанные Всероссийским дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехническим научно-исследовательским институтом (ОАО «ВТИ») и введенные в действие некоммерческим партнерством «ИНВЭЛ» в 2011 году [2; 3]. Вышеуказанные документы были разработаны и введены с разницей в 11 лет. Для применения СТО 70238424.27.100.010–2011 необходимо вступить в некоммерческое партнерство «ИНВЭЛ», а поскольку многие ТЭС не являются в настоящее время членами ИНВЭЛ, оба документа имеют статус действующих.

Необходимо отметить, что членство в некоммерческом партнерстве «ИНВЭЛ» не является обязательным, а присоединение к нему осуществляется на добровольной основе. Неприсоединившиеся организации по-прежнему руководствуются в своей работе при построении подсистем ТЗиЗБ распределенных АСУ ТП ТЭС руководящими документами РД 153-34.1-35.137-00 [2].

Анализ удаленных модулей УСО подсистем сбора и первичной обработки информации для особо ответственных применений (т. е. для подсистем ТЗиЗБ) будем производить согласно требованиям для удаленных модулей УСО, отраженным в вышеуказанных документах, но с учетом дополнительных требований РД 153-34.1-35.127-2002, РД 153-34.1-35.145-2003, ГОСТ Р 51841–2001 (МЭК 61131-2-92), а также требований Ростехнадзора на применение технических устройств, к которым относятся и АСУ ТП, на опасных производственных объектах (котлы, сосуды, трубопроводы и т. д.) ТЭС и рекомендаций, отраженных в книге Ю. Н. Федорова «Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУ ТП» [4–8].

Все вышеперечисленные документы в полной мере регламентируют построение распределенных АСУ ТП для ТЭС для особо ответственных применений.

Еще буквально недавно при проектировании распределенных АСУ ТП с реализацией подсистемы ТЗиЗБ на базе микропроцессорной техники на слуху и «карандашах» проектировщиков были только наименования зарубежных фирм-«тяжеловесов», таких как ABB, Siemens, Honeywell и, конечно же, Yokogawa – признанный лидер в разработке и производстве оборудования для распределенных АСУ ТП ТЭС.

В связи с введением санкций в отношении энергетической отрасли Российской Федерации и проведением Правительством РФ политики импортозамещения возникает необходимость проанализировать возможности предприятий – разработчиков и производителей отечественных модулей удаленных УСО для подсистем ТЗиЗБ АСУ ТП (ответственных применений) ТЭС.

На сегодняшний день оборудование для АСУ ТП ТЭС разрабатывает и производит не один десяток отечественных фирм. Большая работа по анализу удаленных модулей УСО российских производителей выполнена А. Некрасовым в его статье «Контроллеры и УСО российских производителей», в которой дан подробный анализ удаленных модулей УСО совместно с контроллерным оборудованием для централизованных АСУ ТП [9].

На рынке отечественных производителей удаленных модулей УСО для особо ответственных применений в АСУ ТП для ТЭС в общей сложности насчитывается порядка 32 российских производителей. Из данного списка исключены организации, не разрабатывающие и не производящие удаленные модули УСО для АСУ ТП ТЭС средней и большой мощности. Также из этого списка были исключены производители удаленных модулей УСО, не имеющие разрешительных документов надзорного органа (Ростехнадзора) на применение на объектах, ему подконтрольных, или не имеющие документов, подтверждающих соответствие техническим регламентам Таможенного союза.

Таким образом, из общего списка 32 производителей УСО можно выделить четыре ведущих компании:

1. Компания «Модульные системы Торнадо», разрабатывающая и производящая серию удаленных модулей УСО MIRage-N xxx (г. Новосибирск) [10–15].

2. АО «НВТ-Автоматика», являющееся разработчиком и производителем серии удаленных модулей УСО «Армконт А4» (г. Москва) [16].

3. Группа компаний «Текон», разрабатывающая и производящая серию удаленных модулей УСО «Теконик» (г. Москва) [17].

4. Компания «ТРЭЙ-Холдинг», являющаяся разработчиком и производителем серии удаленных модулей УСО контроллеров TREI-5B-05 (г. Пенза) [18].

Анализ технических характеристик отечественных удаленных модулей УСО. Анализ проводился по следующим параметрам:

1. По номинальной температуре воздействия окружающей среды лидером являются удаленные модули УСО серии MIRage-N xxx производства компании «Модульные системы Торнадо», устойчиво работающие при температуре окружающей среды до 70 ºС при требовании нормативно-технических документов – 50 ºС [10–15].

2. По приему дискретных сигналов по постоянному напряжению 220 В с отклонением в +10 % и в – 15 % при токе 5 мА нет явного лидера. Все четыре компании производят соответствующие удаленные модули УСО с упомянутыми характеристиками.

3. По обеспечению надежности цифровой связи (удаленный модуль УСО, установленный в «поле» – модуль центрального процессора, расположенный на щите управления) можно отметить трех производителей: «Модульные системы Торнадо», АО «НВТ-Автоматика», «ТРЭЙ-Холдинг», имеющие в своем составе дублированные интерфейсы (Ethernet-модули серии MIRage-N xxx; RS-485 – TREI-5B-05 и «Армконт А4»), что значительно повышает надежность линий приема-передачи данных удаленных модулей УСО в подсистеме ТЗиЗБ, одним из требований которой является максимальная надежность линий связи [10–16]. Даже обрыв линии связи не должен привести к исключению из работы всего измерительного канала.

4. По скорости обработки сигналов (прием сигнала – выдача управляющего сигнала) выбрать лидера очень сложно, так как эту задачу возможно решить только в периоды проведения наладочных работ при создании АСУ ТП. Модули центрального процессора M912E TREI-5B-05, удаленные модули УСО серии «Армконт А4» (производитель – АО «НВТ-Автоматика») (0,2 с – доказано экспериментально на Красноярской ГРЭС-2 в мае 2015 г. при проведении испытаний защиты по отключению генератора от сети, включению ЭМВ системы регулирования и срабатыванию электромагнитов гидравлического автомата безопасности) попадают в диапазон требований скорости получения и выдачи сигналов [15; 18]. По удаленным модулям УСО других производителей данные по скорости обработки сигналов отсутствуют.

5. По назначенному сроку службы 15 лет, предписанному положениями РД 153-34.1-35.137-00, лидером является «ТРЭЙ-Холдинг» с наработкой на отказ 150000 ч (17 лет) [18].

На втором месте по назначенному сроку службы являются удаленные модули УСО производства компании «Модульные системы Торнадо» со сроком наработки на отказ 15 лет [10–15].

На третьем месте – оборудование компании АО «НВТ-Автоматика» с временем наработки на отказ 11 лет [16].

По удаленным модулям УСО «Теконик» данные по наработке на отказ отсутствуют.

6. По скорости передачи обработанных данных по цифровому каналу модули целесообразно сравнивать при работе по протоколу ModBus RTU.

При работе по этому протоколу удаленные модули УСО трех производителей – «ТРЭЙ-Холдинг», АО «НВТ-Автоматика», группы компаний «Текон» сопоставимы по скорости (115 Кбит/с по RS-485 при длине 1200 м) [16–18].

Удаленные модули УСО «Модульные системы Торнадо» по скорости передачи данных 100 Мбит/с

и протокола ModBus TCP безусловно опережают остальных [10–15]. Но нельзя забывать, что четкая и надежная работа по передаче данных в сети Ethernet выполняется в пределах 100 м, а при больших расстояниях требуется устанавливать дополнительное сетевое оборудование.

7. По наличию сторожевого таймера необходимо отметить две компании – АО «НВТ-Автоматика» и группу компания «Текон». Удаленные модули УСО, ими производимые, имеют дублированный сторожевой таймер [16; 17].

Две другие компании («ТРЭЙ-Холдинг» и «Модульные системы Торнадо») также имеют сторожевой таймер, но недублированного исполнения [10–14].

8. По межповерочному интервалу модули распределились следующим образом:

– 2 года – серия модулей компании «ТРЭЙ-Холдинг»;

– 2 года – серия удаленных модулей УСО «Теконик» [17];

– 1 год – серия модулей компании АО «НВТ-Автоматика» [16].

Межповерочный интервал удаленных модулей УСО с самым максимальным сроком 3 года только у оборудования компании «Модульные системы Торнадо» [10–15].

9. По времени вывода информации на экран после получения признака аварийной ситуации устройства всех вышеперечисленных производителей попадают в требуемый диапазон 0,5 с.

Заключение. Проделанная оценка технических характеристик и практика использования показали, что удаленные модули УСО, производимые рядом отечественных компаний, обеспечены надежной современной элементной базой и технологией производства, отработанными конструктивными и схемными решениями, развитыми средствами самодиагностики, не уступают зарубежным аналогам зарубежных фирм-«тяжеловесов», таких, например, как ABB, Siemens, Honeywell и Yokogawa, и даже превосходят их по некоторым параметрам. Они лучше приспособлены к российским условиям эксплуатации и имеют более качественную и надежную поддержку.

Удаленные модули УСО, производимые вышеуказанными отечественными производителями, открывают большие возможности для построения распределенных АСУ ТП для ответственных применений теплоэлектростанций большой и средней мощности. При этом как заказчик, так и проектировщик должны исходить не только из особенностей конкретного технологического оборудования, но и учитывать то обстоятельство, что средства сбора данных и управления вышеперечисленных производителей отвечают требованиям соответствующих нормативных документов и уже имеют положительный опыт внедрения на ТЭС.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р МЭК 61508–2007. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 1–5. 2014.

2. Технические требования к подсистеме технологических защит, выполненных на базе микропроцессорной техники. РД 153-34.1-35.137-00.

3. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТЭС, условия создания, нормы и требования. СТО 70238424.27.100.010–2011.

4. Общие технические требования к программно-техническим комплексам для АСУ ТП тепловых электростанций. РД 153-34.1-35.127–2002.

5. Технические требования к функции ПТК АСУ ТП ТЭС «Сбор и первичная обработка информации». РД 153-34.1-35.145–2003.

6. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: ФЗ № 116 от 21.07.1997 г.

7. ГОСТ Р 51841–2001 (МЭК 61131-2-92). Программируемые контроллеры. Общие технические требования и методы испытаний.

8. Федоров Ю. Н. Порядок создания, модернизации и сопровождения АСУ ТП. М. : Инфра-Инженерия, 2013. 576 с.

9. Некрасов А. А. Промышленные контроллеры и УСО российских производителей [Электронный ресурс]. URL: http://austrade.ru/content/view/22/57/ (дата обращения: 01.11.15).

10. MIRage-NDIO. Модуль дискретного ввода-вывода : руководство по эксплуатации АБНС.426433.011РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо». Новосибирск, 2010. 27 с.

11. MIRage-NAI. Модуль аналогового ввода : руководство по эксплуатации АБНС.426431.011РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо». Новосибирск, 2010. 26 с.

12. MIRage-NTHERM. Модуль преобразования сигналов термопар : руководство по эксплуатации АБНС. 426431.014РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо». Новосибирск, 2010. 23 с.

13. MIRage-NDI-C. Модуль дискретного ввода : руководство по эксплуатации АБНС.426433.012РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо». Новосибирск, 2010. 21 с.

14. MIRage-NDIO-L. Модуль дискретного ввода-вывода : руководство по эксплуатации АБНС. 426433.017РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо. Новосибирск, 2010. 26 с.

15. MIRage-NPT. Модуль преобразования сигналов термосопротивлений : руководство по эксплуатации АБНС. 426431.013РЭ / ЗАО «Модульные системы Торнадо». Новосибирск, 2010. 23 с.

16. Модули ввода-вывода семейства «Армконт А4» : руководство по эксплуатации АГСН.426450.001РЭ / ЗАО «НВТ-Автоматика». М., 2011. 94 с.

17. Система интеллектуальных модулей «Теконик». Модули ввода-вывода : руководство по эксплуатации. Ч. 2. ДАРЦ.421457.501РЭ2 / ЗАО «Текон» ; ЗАО «Промконтроллер». М., 2012. 120 с.

18. Устройство программного управления TREI-5B-05 : руководство по эксплуатации TREI.421457.501 РЭ / ООО «ТРЭЙ-ГмбХ». Пенза, 2015. 382 с.

References

1. *GOST R 61508–2007 (2014). Funktsional'naya bezopasnost' sistem elektricheskikh, elektronnykh, programmiruemykh elektronnykh, svazannykh s bezopasnost'yu (chast' 1-5)* [State Standard R 61508–2007. Functional safety systems of electrical / electronic / programmable electronic safety-related (part 1–5)] Moscow, Standartinform Publ., 2007.

2. *RD 153-34.1-35.137–00; 2003 Tekhnicheskie trebovaniya k podsisteme tekhnologicheskikh zashhit, vypolnennykh na baze mikroprocessornoy tekhniki* [Technical requirements to the subsystem of technological protection, is implemented on basis of microprocessor technology] Moscow, Standartinform Publ., 2003.

3. *STO 70238424.27.100.010–2011 Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ASUTP) TJeS, usloviya sozdaniya, normy i trebovaniya* [Automated control systems of technological processes (ASUTP) TES, the conditions for the creation, regulations and requirements] Moscow, Standartinform Publ., 2011.

4. *RD 153-34.1-35.127–2002. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya k programmno – tekhnicheskim kompleksam dlja ASU TP teplovye elektrostantsii* [General technical requirements to program-technical complexes for industrial control of thermal power plants] Moscow, Standartinform Publ., 2002.

5. *RD 153-34.1-35.145–2003 Tekhnicheskie trebovaniya k funktsii PTK ASU TP TJeS. Sbor i previchnaya obrabotka informatsii* [Technical requirements for function of the PTC of automated control system of thermal power plant. Collection and primary processing of information] Moscow, Standartinform Publ., 2003.

6. RF Federal law "On industrial safety of hazardous production facilities" № 116 from 21.07.1997 g. (In Russ.).

7. *GOST R 51841–2001. (MJeK 61131-2-92). Programmiruemye kontrollery. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy.* [State Standard R 51841–2001. Programmable controllers. General technical requirements and test methods.] Moscow, Standartinform Publ., 2001.

8. Fedorov Ju. N. *Poradok sozdaniya. Modernizatsiya i soprovozhdenie ASU* [The order of creation. Modernization and maintenance of ACS], Infra-Engineering, 2013. 576 p.

9. Nekrasov A. A. *Promyshlennye kontrollery i USO rossiyskikh proizvoditeley* [Industrial controllers and OFSTED Russian producers] (In Russ). Available at: http://austrade.ru/content/view/22/57/ (accessed: 01.11.15).

10. *Rukovodstvo po ekspluatatsii ABNS 426433.011RJe MIRage-NDIO diskretnogo vvoda – vyvoda* [MIRage-NDIO Discrete input – output module] Closed joint stock company "Tornado Modular Systems", Novosibirsk., 2010. 27 p.

11. *Rukovodstvo po ekspluatacii ABNS 426431. 011RJe MIRage-NAI Modul' analogovogo vvoda (Analog input module) Closed joint stock company "Tornado Modular systems", Novosibirsk, Russia, 2010. 26 p.*

12. *Rukovodstvo po ekspluatacii ABNS 426431.014 RJe MIRage-NDIO Modul' preobrazovaniya signalov termopar* [MIRage-NDIO The conversion unit signals thermocouples] Closed joint stock company "Tornado Modular Systems", Novosibirsk, 2010. 23 p.

13. *Rukovodstvo po ekspluatatsii ABNS 426433.012 RJe MIRage-NDIO Modul' diskretnogo vvoda* [MIRage-NDIO Discrete input module] Closed joint stock company "Tornado Modular Systems", Novosibirsk, 2010. 21 p.

14. *Rukovodstvo po ekspluatatsii ABNS 426433.017 RJe MIRage-NDIO-L Modul' diskretnogo vvoda - vyvoda* [Discrete input module] Closed joint stock company "Tornado Modular systems" Novosibirsk, Russia, 2010. 26 p.

15. *Rukovodstvo po ekspluatatsii ABNS 426431.013 RJe MIRage-NPT Modul' preobrazovaniya signalov termosoprotivleniy* [The module of signal conversion thermal resistance] "Tornado Modular Systems", Novosibirsk, 2010. 23 c.

16. *Rukovodstvo po ekspluatatsii AGSN 426450.001 RJe Modul' vvoda – vyvoda semejstva Armkont A4* [Modules input – output family of Armant A4] Closed joint stock company "NVT-Avtomatika", Moscow, 2011. 94 c.

17. *Rukovodstvo po ekspluatatsii DARC 421457.501 RJe Sistema intelektual'nykh moduley Tekonik* [The intelligent modules Taconic] Closed joint stock company "Promcontroller", Moscow, 2010. 120 c.

18. *Rukovodstvo po ekspluatatsii TREI.421457.501 RJe Ustroystvo programmnogo upravleniya TREI-5B-05* [Device management software TREI-5B-05]. Open joint stock company "TREY GmbH". Penza, 2015. 382 c.

© Гофман П. М., Колесник В. В., Ковалев Д. И., Брезицкая В. В., Першакова К. К., 2015

УДК 537.62

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 929–934

ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ СЛОИСТОГО НАНОКОМПОЗИТА FM/NM/FM/AFM С ОДНООСНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

Ю. В. Захаров[1, 2], А. Ю. Власов[1], Р. В. Авакумов[2*]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82
[*]E-mail: ravakumov@yandex.ru

Рассмотрен процесс перемагничивания слоистого нанокомпозита FM/NM/FM/AFM, состоящего из магнитного сэндвича FM/NM/FM, расположенного на антиферромагнитной подложке (AFM). Магнитный сэндвич состоит из двух ферромагнитных слоев (FM), разделенных немагнитной прослойкой (NM). Нахождение распределения намагниченности в сэндвиче сводится к решению дифференциальных уравнений, определяющих указанное распределение в каждом слое. Дифференциальные уравнения дополняются граничными условиями. На границе между ферромагнитным слоем и антиферромагнитной подложкой ставится граничное условие жесткого закрепления магнитного вектора, на границе ферромагнитной пленки с вакуумом используется граничное условие свободного конца. Соединение ферромагнитных слоев посредством тонкой немагнитной прослойки моделируется парой граничных условий, одно из которых является нелинейным. Для описания процесса используются полученные ранее аналитические решения уравнения Ландау–Лифшица в системе координат, связанной с углом поворота намагниченности в плоскости пленки и расстоянием от границы FM/AFM.

В ходе расчетов получено уравнение, определяющее пороговые поля перемагничивания, построены зависимости проекции намагниченности на направление внешнего магнитного поля. Полученные кривые намагничивания имеют гистерезис, обусловленный одноосной анизотропией. Для иллюстрации влияния физических характеристик немагнитной прослойки на магнитный гистерезис рассматриваемой многослойной магнитной пленки была построена зависимость ширины петли гистерезиса от комбинации параметров, характеризующих прослойку. В будущем полученные результаты могут использоваться для теоретического предсказания физических характеристик ферромагнитных пленок типа FM/NM/FM/AFM.

Ключевые слова: магнитный сэндвич, ферромагнитная пленка, немагнитная прослойка.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 929–934

MAGNETIZATION [REVERSAL] OF LAYERED NANOCOMPOSITE FM/NM/FM/AFM WITH UNIAXIAL ANISOTROPY

Yu. V. Zakharov[1, 2], A. Yu. Vlasov[1], R. V. Avakumov[2*]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
[*]E-mail: ravakumov@yandex.ru

In present paper we consider magnetization reversal of layered nanocomposite magnetic film FM/NM/FM/AFM. Magnetic film consists of magnetic sandwich structure FM/NM/FM applied to antiferromagnetic substrate (AFM). Nonmagnetic spacer (NM) divides magnetic sandwich involving two ferromagnetic layers (FM). Differential equations describe magnetization distributions in each magnetic layer of magnetic sandwich. We use the following boundary conditions in pointed task. Fixed boundary condition specifies the boundary between ferromagnetic layer and antiferromagnetic substrate and free end boundary condition specifies the boundary between ferromagnetic layer and vacuum. In addition to that two boundary conditions simulate nonmagnetic layer. One of them is nonlinear. Landau–Lifshitz differential equation describes magnetization process. We wrote this equation in coordinate system bounded with magnetization rotation angle and distance from ferromagnetic-antiferromagnetic boundary to simplify calculations.

Carrying out our investigation we obtain algebraic equation defining magnetization threshold fields, construct applied field projection of magnetization graph. Magnetization curve shows hysteresis caused by uniaxial anisotropy. We obtain a graph showing a hysteresis loop thickness depends on nonmagnetic spacer physical characteristics to demonstrate how nonmagnetic spacer has effect on magnetic hysteresis properties of multilayer magnetic film. Investigation results could be used for prediction of some physical characteristics of magnetic FM/NM/FM/AFM films.

Keywords: magnetic sandwich, magnetic film, nonmagnetic spacer.

Введение. Магнитные пленки с одноосной анизотропией используются при конструировании слоистых нанокомпозитов, представляющих собой магнитный сэндвич из двух ферромагнитных слоев, разделенных немагнитной прослойкой (FM/NM/FM), на антиферромагнитной подложке (FM/NM/FM/AFM). Изучению таких магнитных систем посвящено множество работ (см., например, обзор [1]). Такие системы находят применение в качестве основы для различных устройств спинтроники, например, спиновых вентилей, работа которых базируется на эффекте гигантского магнитосопротивления. Различные свойства, в том числе магнитные, таких структур экспериментально изучались во множестве работ, здесь приведем некоторые из последних исследований [2–6]. В работе [2] экспериментально изучаются магнитные свойства спиновых вентилей NiFe/Cu/NiFe/IrMn, приводятся зависимости величины обменного смещения от толщины прослойки, кривые намагничивания. В работе [3] изучается ферромагнитный резонанс в указанных выше пленках. Магнитные свойства сэндвичей Co/Cu/Co изучаются в работах [4; 5]. В работе [6] изучается эффект гигантского магнитосопротивления в спиновых вентилях NiFe/CoFe/Cu/CoFe/IrMn.

Настоящая работа является продолжением работ, посвященных аналитическому описанию процесса перемагничивания указанных слоистых магнитных пленок с обменной связью [7–15].

Постановка задачи. Мы будем рассматривать расположенный на AFM-подложке магнитный сэндвич FM/NM/FM, верхний ферромагнитный слой которого имеет одноосную анизотропию. Для нашего расчета введем декартову систему координат для рассматриваемой пленки (рис. 1). Мы будем предполагать, что процессы изменения направления намагниченности происходят в верхнем и нижнем слоях сэндвича. Для каждого слоя вводится собственная система координат. Как показано на рис. 1, магнитный вектор, граничащий с подложкой, закреплен в направлении оси x_1. Направление внешнего магнитного поля **H** противоположно указанной оси и совпадает с осью легкого намагничивания.

При такой постановке задачи, как показывалось в приведенных выше работах, под действием внешнего магнитного поля **H** в слоях будет иметь место неоднородное распределение намагниченности по толщине пленки. Предполагаем, что размагничивающий фактор вдоль оси z достаточно велик для того, чтобы сориентировать намагниченность пленки в ее плоскости, поэтому проекцией намагниченности на ось z пренебрегаем. В соответствии с указанными выше допущениями о физических характеристиках слоев можно следующим образом записать уравнения, определяющие углы поворота φ_1 и φ_2 векторов намагниченности относительно оси x соответственно в нижнем и верхнем слоях, характеризуемых толщинами d_1, d_2, константами внутреннего обмена α_1, α_2, намагниченностями насыщения M_1 и M_2:

$$\frac{d^2\varphi_1}{d\zeta_1^{\,2}}+\frac{hd_1^2}{\alpha_1}\sin\varphi_1=0, \tag{1}$$

$$\frac{d^2\varphi_2}{d\zeta_2^{\,2}}+\frac{\eta hd_2^2}{\alpha_2}\sin\varphi_2-\frac{\beta d_2^2}{\alpha_2}\sin\varphi_2\cos\varphi_2=0, \tag{2}$$

где $h = H / M_1$, $\eta = M_1 / M_2$. Параметром β характеризуется одноосная анизотропия верхнего слоя. Приведенные уравнения получаются из известного уравнения Ландау–Лифшица путем перехода в систему координат, связанную с углами вращения вектора намагниченности вокруг оси z в плоскости xy. В уравнениях (1) и (2) используются нормированные безразмерные переменные $\zeta_1 = z/d_1$ и $\zeta_2 = z/d_2$. Уравнение, учитывающее одноосную анизотропию (2), рассматривалось ранее в разных формах записи в работах [7–9], посвященных процессам перемагничивания и спин-волнового резонанса в пленках FM/AFM с однонаправленной анизотропией.

Углы φ_1 и φ_2 связаны с проекциями намагниченности на оси x и y следующими соотношениями:

$$M_{1x} = M_1\cos\varphi_1,\ M_{1y} = M_1\sin\varphi_1, \tag{3}$$

$$M_{2x} = M_2\cos\varphi_2,\ M_{2y} = M_2\sin\varphi_2. \tag{4}$$

К уравнениям (1), (2) ставятся граничные условия [10]

$$\begin{cases}\varphi_1\big|_{\zeta_1=0}=0,\\ \left.\dfrac{d\varphi_2}{d\zeta_2}\right|_{\zeta_2=1}=0,\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\eta\left.\dfrac{d\varphi_1}{d\zeta_1}\right|_{\zeta_1=1}=\dfrac{\alpha_s d_1}{\alpha_1 d_s}\sin\left(\varphi_2\big|_{\zeta_2=0}-\varphi_1\big|_{\zeta_1=1}\right),\\ \eta^2\dfrac{d_2}{d_1}\left.\dfrac{d\varphi_1}{d\zeta_1}\right|_{\zeta_1=1}=\gamma\left.\dfrac{d\varphi_2}{d\zeta_2}\right|_{\zeta_2=0},\end{cases} \tag{6}$$

где $\gamma = \alpha_2/\alpha_1$ – отношение обменных постоянных; d_s – толщина прослойки; α_s – эффективная постоянная межслойного обменного взаимодействия. Первое условие в (6) является нелинейным и выражает неравенство приграничных углов поворота вектора намагниченности. В таком виде указанное условие получается благодаря нелинейному вкладу в полную энергию пленки энергии межслойного взаимодействия, записанной в следующем виде:

$$U_s=-\frac{\alpha_s}{d_s}\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\,. \tag{7}$$

Синус разности углов в (6) появляется при варьировании энергии (7).

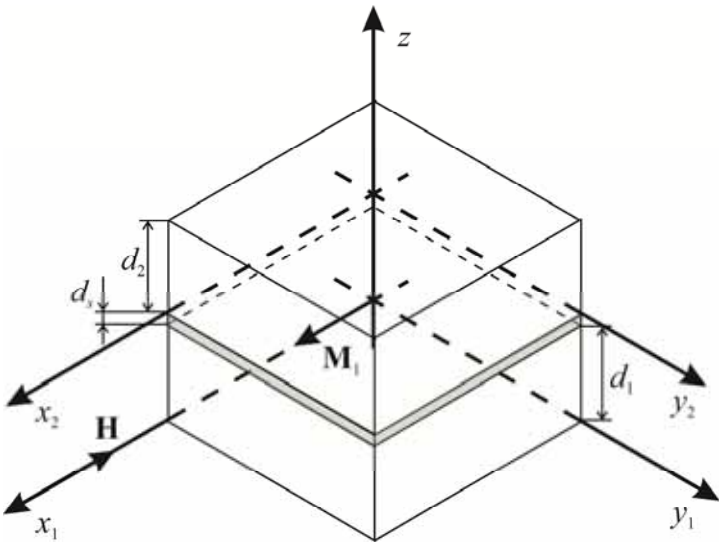


Рис. 1. Система координат: вектор намагниченности $\mathbf{M}_1$ на границе FM/AFM считается неподвижным и ориентированным антипараллельно внешнему полю **H**

Кривые перемагничивания и пороговые поля. Решение уравнения (1) можно представить в следующем виде:

$$\varphi_1 = 2\arcsin\left[k_1\,\mathrm{sn}\left(\sqrt{\frac{hd_1^2}{\alpha_1}}\zeta_1 + F_1, k_1\right)\right], \qquad (8)$$

где sn – эллиптический синус Якоби; k_1 – эллиптический модуль; F_1 – константа интегрирования. Решение уравнения (2) представим в виде

$$\varphi_2 = 2\,\mathrm{arctg}\left[t_c\,\mathrm{cn}\left(A\sqrt{\frac{\eta h d_2^2}{\alpha_2}}\zeta_2 + F_2, k_2\right)\right], \qquad (9)$$

где cn – эллиптический косинус Якоби; k_2 – эллиптический модуль; $t_c = \mathrm{tg}(\varphi_{2c}/2)$, где φ_{2c} – значение угла поворота вектора намагниченности на границе верхнего слоя пленки с вакуумом. Эллиптический модуль k_2 связан с параметром t_c приведенным ниже соотношением:

$$k_2^2 = \frac{t_{\acute{n}}^2\left[1 + t_{\acute{n}}^2 + 2B\,t_{\acute{n}}^2\right]}{\left(1 + t_{\acute{n}}^2\right)\left[1 + t_{\acute{n}}^2 + 2B\left(t_{\acute{n}}^2 - 1\right)\right]}. \qquad (10)$$

В (9) и (10) были использованы следующие обозначения:

$$A = -\sqrt{\frac{2B\,(t_{\acute{n}}^2 - 1)}{1 + t_{\acute{n}}^2} + 1}, \qquad (11)$$

$$B = \frac{\beta}{2h\eta}. \qquad (12)$$

Из выражения (10) следует, что эллиптический модуль k_2 лежит в пределах от 0 до 1, как и требуется для эллиптических функций. Решение (9) уравнения (2) в настоящей работе записано аналогично [7]. Такая форма записи в настоящей статье использована в целях упрощения применения граничных условий сопряжения слоев.

Для упрощения дальнейших выражений примем следующие обозначения:

$$q_1 = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{h}{h_u}}, \qquad q_2 = A\frac{\pi}{4}\frac{d_2}{d_1}\sqrt{\frac{\eta}{\gamma}\frac{h}{h_u}},$$

$$h_u = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{4d_1^2}. \qquad (13)$$

Величина h_u представляет собой пороговое поле начала процесса перемагничивания пленки толщиной $2d_1$ и введена для последующего сравнения с полученными в предыдущих работах результатами. Применяя граничные условия (5) к решениям (8) и (9), получим $F_1 = 0$, $F_2 = -q_2$. С учетом этого выражения для углов поворота вектора намагниченности в слоях можно записать следующим образом:

$$\varphi_1 = 2\arcsin\left[k_1\,\mathrm{sn}\,(q_1\zeta_1, k_1)\right], \qquad (14)$$

$$\varphi_2 = 2\,\mathrm{arctg}\left[t_c\,\mathrm{cn}\,(q_2(\zeta_2 - 1), k_2)\right]. \qquad (15)$$

Неизвестные t_c и k_1 определяются из граничных условий (6). После подстановки (14) и (15) в (6) получим:

$$\begin{cases} \eta k_1 q_1 cn_1 = \dfrac{\alpha_s d_1}{\alpha_1 d_s}\dfrac{t_c cn_2\left(1 - 2k_1^2 sn_1^2\right) - k_1 sn_1 dn_1\left(1 - t_c^2 cn_2^2\right)}{1 + t_c^2 cn_2^2}, \\ k_1 q_1 \dfrac{\eta^2}{\gamma}\dfrac{d_2}{d_1} cn_1\left(1 + t_c^2 cn_2^2\right) = t_c\, q_2\, sn_2\, dn_2, \end{cases} \qquad (16)$$

где $sn_1 = \mathrm{sn}(q_1, k_1)$, $sn_2 = \mathrm{sn}(q_2, k_2)$, $cn_1 = \mathrm{cn}(q_1, k_1)$, $cn_2 = \mathrm{cn}(q_2, k_2)$, $dn_1 = \mathrm{dn}(q_1, k_1)$, $dn_2 = \mathrm{dn}(q_2, k_2)$.

Для определения пороговых значений начала процесса веерного вращения намагниченности в слоях перейдем к пределу $k_1 \to 0$, $t_c \to 0$ ($k_2 \to 0$). Тогда эллиптические функции сведутся к тригонометрическим, и система уравнений (16) перейдет в линейную алгебраическую систему уравнений относительно k_1 и t_c:

$$\begin{cases} k_1\left(\eta\rho q_1 \cos q_1 + \sin q_1\right) - t_c \cos q_2 = 0, \\ k_1 q_1 \dfrac{\eta^2}{\gamma}\dfrac{d_2}{d_1}\cos q_1 - t_c q_2 \sin q_2 = 0, \end{cases} \qquad (17)$$

где использовано обозначение

$$\rho = \alpha_1 d_s / (\alpha_s d_1). \quad (18)$$

Определитель системы уравнений (17), приравненный к нулю, даст уравнение, определяющее пороговые значения внешнего перемагничивающего поля:

$$\eta\rho\frac{\pi}{4}\sqrt{h_{th}} + \mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4}\sqrt{h_{th}}\right) = \\ = \frac{\eta^2}{\sqrt{\gamma}\sqrt{\eta - \beta_u / h_{th}}}\mathrm{ctg}\left(\frac{\pi}{4}\frac{d_2}{d_1}\sqrt{1-\frac{\beta_u}{\eta h_{th}}}\sqrt{\frac{\eta}{\gamma}h_{th}}\right), \quad (19)$$

где h_{th} – пороговое поле перемагничивания, нормированное на h_u; $\beta_u = \beta/h_u$. При отсутствии анизотропии и немагнитной прослойки получим уже известное [11] выражение для порогового поля пленки FM/AFM толщиной $2d_1$:

$$h_{th} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{\alpha_1}{4d_1^2}. \quad (20)$$

Далее в качестве частного случая будем рассматривать расположенный на антиферромагнитной подложке сэндвич FM/NM/FM, включающий два ферромагнитных слоя, отличающихся только наличием одноосной анизотропии в верхнем слое. Используя (3) и (4), можно записать проекцию среднего значения x-компоненты нормированной намагниченности пленки, которая наблюдается в экспериментах по перемагничиванию магнитных пленок:

$$\overline{m}_x = -\frac{1}{2} + \frac{1}{q_1}E\left(\mathrm{am}\left(q_1, k_1\right), k_1\right) + \\ + \frac{1}{2}\int_0^1 \frac{1 - t_c\,\mathrm{cn}\left(q_2\left(z-1\right), k_2\right)}{1 + t_c^2\,\mathrm{cn}^2\left(q_2\left(z-1\right), k_2\right)}dz. \quad (21)$$

Решая систему уравнений (16) относительно k_1 и t_c при разных значениях отношения h/h_u и используя (21), получим зависимость средней намагниченности пленки от внешнего поля. Результаты приведены в виде графиков на рис. 2. Расчеты проводились при разных значениях отношения β/h_u и при значении $\rho = 3$. Такое значение для параметра ρ было выбрано из тех соображений, что процесс квазистатического перемагничивания при таком значении носит характер двухпороговой потери устойчивости [10], которая выражается в следующем. При достижении некоторого порогового значения внешнего магнитного поля начинается процесс вращения намагниченности в обоих ферромагнитных слоях, намагниченность в которых изначально ориентирована антипараллельно направлению внешнего поля. При последовательном увеличении внешнего магнитного поля наступает момент, когда намагниченность верхнего слоя ориентируется по полю, а намагниченность нижнего слоя, напротив, ориентирована против поля. На рис. 2 соответствующее значение поля обозначено точкой *A* на кривой *1*. Далее следует интервал значений внешнего магнитного поля (от точки *A* до точки *B*), на котором не происходит вращение намагниченности; и после достижения некоторого второго порогового значения начинается процесс вращения намагниченности в нижнем слое.

Как видно из рис. 2, кривые *2* и *3* имеют гистерезис в начале процесса перемагничивания при полях меньших либо порядка h_u. Петля гистерезиса раскрывается при значении $\beta/h_u > 1/4$ [8; 11]. С некоторого значения величины внешнего поля, обозначенного точкой *B* на рис. 2, кривые сливаются, чего и следовало ожидать, поскольку мы рассматриваем случай, отличающийся только постоянной одноосной анизотропией в верхнем слое.

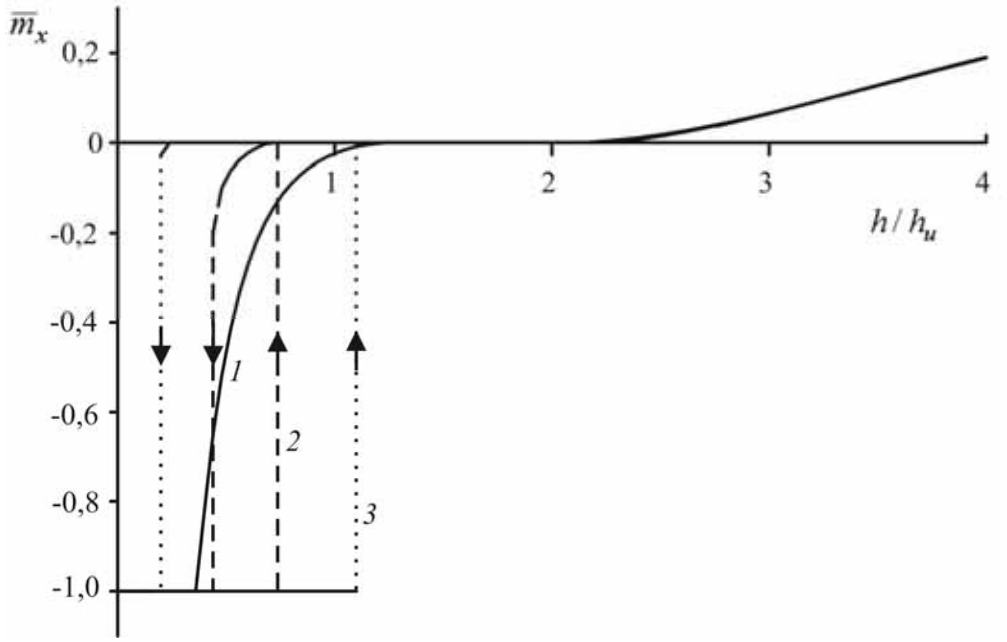


Рис. 2. Зависимость средней намагниченности от внешнего поля:
1 – $\beta/h_u = 0$; *2* – $\beta/h_u = 0{,}38$; *3* – $\beta/h_u = 0{,}75$

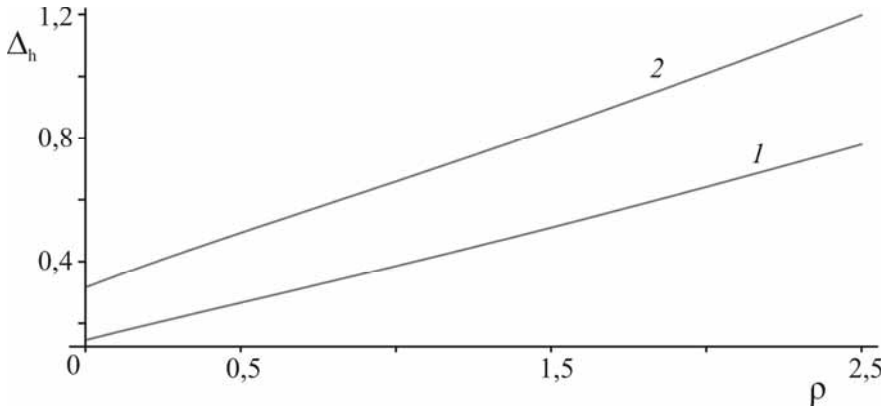


Рис. 3. Зависимость ширины петли гистерезиса от параметра ρ:
1 – $\beta/h_u = 0{,}75$; *2* – $\beta/h_u = 1{,}00$

На рис. 3 приведена зависимость ширины петли гистерезиса Δ_h от параметра ρ при различных значениях величины одноосной анизотропии. Поскольку параметр ρ зависит от толщины прослойки (18), то, как видно из рис. 3, с увеличением толщины прослойки ширина петли гистерезиса увеличивается.

Заключение. В настоящей статье было получено алгебраическое уравнение, определяющее пороговые поля перемагничивания, и алгебраические уравнения для нахождения констант интегрирования, определяющих распределение намагниченности в магнитном сэндвиче FM/NM/FM. Были построены кривые перемагничивания в случае слабой обменной связи магнитных слоев при разных значениях параметра одноосной анизотропии. Показано, что кривые перемагничивания имеют гистерезис. Были проделаны расчеты ширины петли гистерезиса при различных значениях константы одноосной анизотропии и физических характеристик немагнитной прослойки.

Библиографические ссылки

1. Exchange bias in nanostructures / J. Nogues [et al.] // Physics Reports. 2005. Vol. 422. P. 65–117.

2. Asymmetry of Magnetization Reversal of Pinned Layer in NiFe/Cu/NiFe/IrMn Spin-Valve Structure / N. G. Chechenin [et al.] // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2014. Vol. 27. P. 1547–1552.

3. Staudacher T., Tsoi M. Spin-torque-driven ferromagnetic resonance in point contacts // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109. P. 07C912-1.

4. Néel coupling in Co/Cu/Co stripes with unidirectional interface roughness / A. V. Davydenko [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 377. P. 334–342.

5. Qiu Z. Q., Pearson J., Bader S. D. Oscillatory interlayer magnetic coupling of wedged Co/Cu/Co sandwiches grown on Cu(100) by molecular beam epitaxy // Physical Review B. 1992. Vol. 46. P. 8659.

6. Interlayer Coupling and Magnetoresistance of MnIr-Based Spin Valves: Dependencies on Deposition Rate, Spacer Thickness, and Temperature / J. M. Teixeira [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. Vol. 43. P. 3143.

7. Salansky N. M., Eruchimov M. Sh. The peculiarities of spin-wave resonance in films with ferro-antiferromagnetic interaction // Thin Solid Films. 1970. Vol. 6. P. 129–140.

8. Захаров Ю. В., Хлебопрос Е. А. Кривые намагничивания и частоты магнитного резонанса в пленках с доменной структурой на антиферромагнитной подложке // ФТТ. 1980. № 22. С. 3651–3657.

9. Ерухимов М. Ш., Середкин В. А., Яковчук В. Ю. Доменная структура и перемагничивание пленок с однонаправленной и одноосной анизотропией // ФММ. 1981. № 52. С. 57–62.

10. Захаров Ю. В., Власов А. Ю., Авакумов Р. В. Продольное перемагничивание мультислойной ферромагнитной системы с немагнитной прослойкой // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 15–18.

11. Захаров Ю. В. Статическая и динамическая потеря устойчивости ферромагнитного слоя при перемагничивании // ДАН. 1995. Т. 344, № 3. С. 328–332.

12. Aharoni A., Frei E. H., Shtrikman S. Theoretical approach to the asymmetrical magnetization curve // Journal Of Applied Physics. 1959. Vol. 30. P. 1956–1961.

13. Середкин В. А., Фролов Г. И., Яковчук В. Ю. Квазистатическое перемагничивание пленок с ферро-ферримагнитным обменным взаимодействием // ФММ. 1987. № 63. С. 457.

14. Пороги перемагничивания магнитомягкого слоя в обменно-связанной структуре в зависимости от поверхностного обмена / Ю. В. Захаров [и др.] // Новые магнитные материалы микроэлектроники : сб. тр. XX Междунар. школы-семинара / Физфак МГУ. 2006. С. 201–203.

15. Игнатченко В. А. Граничные условия для магнитных и магнитоупругих систем // ФММ. 1973. № 36. С. 1219–1228.

References

1. Sort Nogues J., Langlais V., Skumryev V., Surinach S., Munoz J. S., Baro M. D. Exchange bias in nanostructures. *Physics Reports*, 2005, Vol. 422, P. 65–117.

2. Chechenin N. G., Chernykh P. N., Dushenko S. A., Dzhun I. O., Goikhman A. Y., Rodionova V. V.

Asymmetry of Magnetization Reversal of Pinned Layer in NiFe/Cu/NiFe/IrMn Spin-Valve Structure. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2014, Vol. 27, P. 1547–1552.

3. Staudacher T., Tsoi M. Spin-torque-driven ferromagnetic resonance in point contacts. *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 109, P. 07C912-1.

4. Davydenko A. V., Pustovalov E. V., Ognev A. V., Kozlov A. G., Chebotkevich L. A., Han X. F. Néel coupling in Co/Cu/Co stripes with unidirectional interface roughness. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, Vol. 377, P. 334–342.

5. Qiu Z. Q., Pearson J., Bader S. D. Oscillatory interlayer magnetic coupling of wedged Co/Cu/Co sandwiches grown on Cu(100) by molecular beam epitaxy. *Physical Review B*, 1992, Vol. 46, P. 8659.

6. Teixeira J. M., Ventura J. O., Fermento R. P., Araujo J. P., Sousa J. B., Freitas S. C., Freitas P. P. Interlayer Coupling and Magnetoresistance of MnIr-Based Spin Valves: Dependencies on Deposition Rate, Spacer Thickness, and Temperature. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, Vol. 43, P. 3143.

7. Salansky N. M., Eruchimov M. Sh. The peculiarities of spin-wave resonance in films with ferro-antiferromagnetic interaction. *Thin Solid Films*, 1970, Vol. 6, P. 129–140.

8. Zakharov Yu. V., Khlebopros Ye. A. [Magnetization curves and magnetic resonance frequencies of domain structured films on antiferromagnetic sustrate]. *FTT*, 1980, No 22, P. 3651–3657 (In Russ.).

9. Erukhimov M. Sh., Seredkin V. A., Yakovchuk V. Yu. [Domain structure and magnetisaton reversal of films with uniaxial and unidirectional anisotropy]. *FMM*, 1981, No 52, P. 57–62 (In Russ.).

10. Zakharov Yu. V., Vlasov A. Yu., Avakumov R. V. [Dilatational magnetic polarity reversal of multilayer ferromagnetic system with nonmagnetic interlayer]. *Vestnik SibGAU*, 2010, No. 2 (28), P. 15–18 (In Russ.).

11. Zakharov Yu. V. Static and dynamic instabilities caused by switching of ferromagnetic layer. *DAN*, 1995, Vol. 344, P. 328–332.

12. Aharoni A., Frei E. H., Shtrikman S. Theoretical approach to the asymmetrical magnetization curve. *Journal Of Applied Physics*, 1959, Vol. 30, P. 1956–1961.

13. Seredkin V. A., Frolov G. I., Yakovcuk V. Yu. [Quasi-static magnetization of films with ferro-ferrimagnetic exchange interaction]. *FMM*, 1987, No. 63, P. 457 (In Russ.).

14. Zakharov Yu. V., Frolov G. I., Seredkin V. A., Vlasov A. Yu., Yakovcuk V. Yu., Stolyar S. V. [Magnetization thresholds of softmagnetic layer in exchange coupling system against surface exchange]. *XX mezhdunar. shkola-seminar "Novye magnitnye materialy mikroelektroniki": sbornik trudov* [XX international school-seminar "New magnetic materials of microelectronics": proceedings]. Phys. Dep. MSU, 2006, P. 201–203 (In Russ.).

15. Ignatchenko V. A. [Boundary conditions for magnetic and magnetoelastic systems]. *FMM*, 1973, No. 36, P. 1219–1228 (In Russ.).

© Захаров Ю. В., Власов А. Ю., Авакумов Р. В., 2015

UDC 539.21(06)

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 935–940

STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PLASMA-MODIFIED UHMWPE

I. V. Karpov[1, 2], A. V. Ushakov[1, 2], A. A. Lepeshev[2, 3], L. Yu. Fedorov[2*], A. A. Shaihadinov[2]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[3]Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

The results of studying of nanocomposite materials based on ultra-high-molecular-weight polyethylene filled with copper oxide nanopowder produced in plasma of low-pressure arc discharge are presented. The process of the vacuum-plasma synthesis of powdered composite mixtures, which involves the treatment of powders of the polymer matrix material in a device for synthesizing nanopowders at low temperatures, is described. The results of the experimental study of the specimens are presented.

Keywords: nanoparticles, ultra-high-molecular-weight polyethylene, nanocomposite, plasma of low-pressure arc discharge, tribological properties.

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 935–940

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО В ПЛАЗМЕ

И. В. Карпов[1, 2], А. В. Ушаков[1, 2], А. А. Лепешев[2, 3], Л. Ю. Федоров[2*], А. А. Шайхадинов[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
[3]Красноярский научный центр СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

Представлены результаты исследований нанокомпозиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с наполнителем, в качестве которого использовался нанопорошок оксида меди, полученный в плазме дугового разряда низкого давления. Описан процесс вакуумно-плазменного синтеза порошковых композиционных смесей, в процессе которого в устройстве для синтеза нанопорошков в ходе низкотемпературного процесса обрабатываются порошки полимерной матрицы. Приводятся результаты экспериментальных исследований изготовленных образцов.

Ключевые слова: наночастицы, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, нанокомпозиты, плазма дугового разряда низкого давления, трибологические свойства.

Introduction. Interest in the new available nanocomposites (NCs) is due to the possibility of controlling their physicomechanical and tribological characteristics under the operating conditions of friction units in various machines and mechanisms. This progressively developing direction is considered to be almost the only method for producing functional materials, which makes it possible to form articles with improved performance characteristics [1–5]. Nanocomposites are currently widely used as structural and tribological materials, which replace traditional ferrous metals and alloys; they play an important role in reducing material consumption in the manufacture of machines and mechanisms, as well as in enhancing their reliability and durability.

A low cost and the availability of thermoplastic polymers and powdered nanofillers, as well as the possibility of using traditional methods and equipment to produce NCs, ensure high efficiency of their manufacture and the introduction of these materials into machine building [6; 7].

Designing promising NCs is based on an analysis of the operating conditions of friction units, such as bearings

and seals of various machines. For friction units that do not undergo impact loads, composite materials can be modified by spherical strengthening particles without using fibrous materials [8; 9]. This makes it possible to use plasma-chemical methods most efficiently to modify and synthesize the original materials for NCs.

In the course of designing NCs, the problem of selecting a polymer matrix and a nanofiller (particles of a strengthening phase) is solved. The polymer matrix should meet the requirements, such as a high or sufficient mechanical strength, resistance to aggressive media, satisfactory tribological (primarily, antifriction) characteristics, as well as sufficient thermal and wear resistance.

In order to improve the mechanical strength of a polymer matrix, a nanofiller should have higher hardness and strength than the material of the matrix, high or satisfactory antifriction characteristics, a high thermal conductivity, and a satisfactory adhesion to the material of the matrix or a chemical bond with it.

In this work, results of studying the vacuum plasma-arc modification of UHMWPE on the mechanical and tribological characteristics of polymer composites are presented.

Experimental. Ticona Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) (Germany) with a molecular weight of 2–7 mln carbon units and composite materials on its basis were studied. Specimens were produced by hot compaction at a pressure of 10 MPa, a temperature of 190 °C, and a rate of subsequent cooling of 3–4 K/min.

The vacuum plasma-arc modification of UHMWPE was carried out using the method described in [10–12]. This method makes it possible to preliminarily treat original UHMWPE powder by ions of an inert gas in glow discharge, as well as to simultaneously CuO nanopowder and to deposit in onto surfaces of UHMWPE particles. Thus, powdered composite mixtures of the polymer matrix and filler with various mass ratios were prepared; both untreated mixtures and mixtures preliminarily treated in glow discharge were used.

The wear resistance and the coefficient of sliding friction were determined using a Tribometer instrument (CSM Instruments, Switzerland) with the pin-on-disc arrangement. The counterbody was a polished ball made from the 100Sgb steel, which was an analog of the ShKh15 steel with a hardness of 1550 HV.

Young's modulus of 220 GPa, and a density of 3.0–3.2 g/sm^3.

The test conditions were as follows: the counterbody was a polished ball3 mm in diameter, the counterbody material was 100Sgb steel, the normal load was 1 N, the radius of the wear ring was 9–11 mm, the linear velocity was 20 cm/s, and the specified duration of the test was 5000 rev.

After the tests, the diameter of a wear spot on the counterbody (the stationary ball) and the width of a wear groove on the rotating specimen were visually determined using MBS-10 and AXIOVERTCA25 (Karl Zeiss, Germany) microscopes. The depth of the wear groove was measured using a WYKONT 1100 optical profilometer (VEECO, United States). The depth and width of the grooves were measured in four to six diametrically and orthogonally opposite regions and then averaged. The test results were used to determine the wear rate I (the ratio of the thickness of the worn layer to the friction path), the coefficient of friction f, and the microhardness of the friction surface H.

The mechanical characteristics of the polymer composites (PCs) with various concentrations of the filler were determined according to GOST 11262-80. During the tensile tests, the modulus of elasticity E_p, the ultimate strength σ_{pp}, and the relative elongation ε_{pp} were measured.

Results and discussion. Fig. 1–3 show the dependences of the physicochemical characteristics of the PCs in tension on the concentration of CuO in these composites. The effect of the method for preliminary plasma-chemical treatment on the characteristics of the PCs was studied. An analysis of the dependences of σ_{pp} and ε_{pp} has shown that they have fairly pronounced extreme points. For the ultimate tensile strength, these extreme points correspond to a concentration of CuO of approximately 2–3 %. For both untreated NCs and NCs preliminarily treated by glow discharge, the curves of the dependences of the ultimate strength on the concentration of CuO are almost identical. With an increase in the concentration of CuO powder, the modulus of elasticity E_p rises from ~ 500 MPa to 3500 MPa or higher.

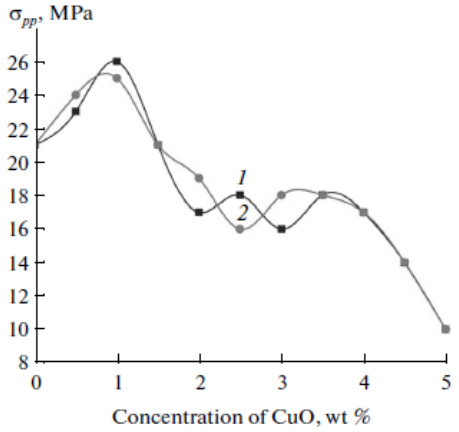


Fig. 1. Ultimate strength of NCs based on UHMWPE and CuO:
1 – after preliminary ion treatment; *2* – untreated

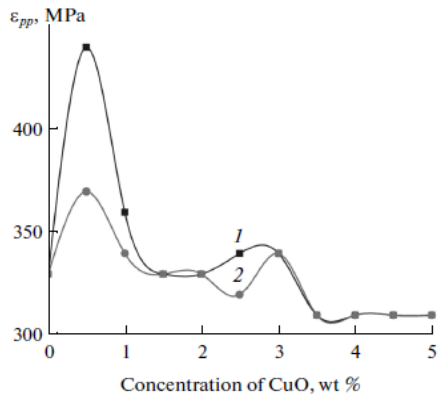


Fig. 2. Ultimate relative elongation of NCs based on UHMWPE and CuO:
1 – after preliminary ion treatment; *2* – untreated

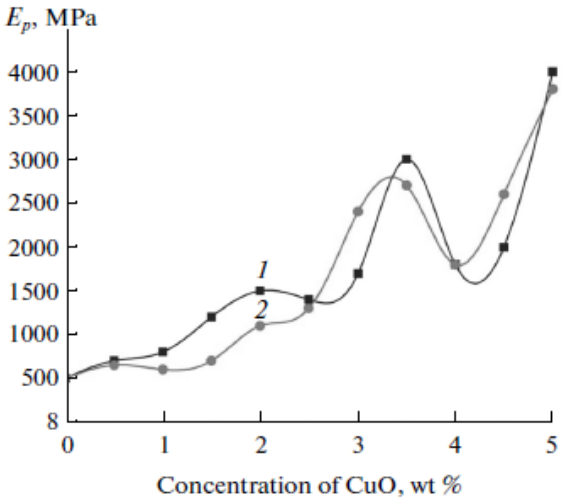


Fig. 3. Modulus of elasticity in tension of NCs based on UHMWPE and CuO:
1 – after preliminary ion treatment; *2* – untreated

The nonmonotonous dependence of the modulus of elasticity on the concentration of CuO is also confirmed by the fact that, at very high concentrations of CuO, single values of the modulus of elasticity of 6000 and even 8000 MPa can be recorded.

The observed effects are apparently due to changes in molecular mobility (the flexibility of chains) that result from the effect of various factors, primarily the degree of crystallinity and the pattern of supramolecular structures [13]. In addition, the pattern of supramolecular structures in filled crystalline polymers also determines the mechanism of the fracture of a polymer, such as the propagation of cracks, as well as adhesive or cohesive fracture, which is also governed by the concentration of a filler. In connection with this, reactions of the polymer with the filler, which are usually considered as the necessary condition for the reinforcing effect of the filler to occur, can lead to either an increase or decrease in the strength characteristics depending on the degree of change in the molecular mobility of chains in surface layers.

Fig. 4 shows the dependences of the coefficient of friction on the applied load. It can be seen in these dependences that the optimum concentration of the filler at which the minimum values of the coefficient of friction are observed is 2 and 3 wt % for the NCs preliminarily treated by glow discharge and the untreated NCs, respectively. For unfilled UHMWPE treated by glow discharge, the coefficient of friction exceeds by 1.6–2 times the minimum values of the coefficient of friction obtained for the filled materials; for the specimen produced by compacting original (not subjected to any treatment) UHMWPE, the values off are substantially higher than for the preliminarily treated UHMWPE specimen.

Fig. 5 shows the concentration dependences off *I*, and *H* obtained at a maximum load of 19 N. With an increase in the concentration of the filler, the wear rate decreases and the microhardness of the surface rises. The specimens preliminarily treated in glow discharge have substantially lower values of the wear rate, the microhardness, and the coefficient of friction.

As follows from an analysis of the results obtained, the regularities of the contact and friction of the PCs are in line with the molecular-mechanical theory of friction and wear. Friction results in the wear of the NCs, which is the mode of surface fracture typical of a composite. The wear of the materials under study occurs apparently due to both adhesion and deformation. For the majority of the specimens tested, elastic deformation can be considered as the dominant mode of the friction and rupture of friction junctions. During the running-in of the preliminarily ion-treated specimens under the maximum load, plastic deformation accompanied by fatigue wear occurred. When the tests continued, this mode of contact changed into the elastic deformation of the contact of the specimen with the rigid surface of the disc.

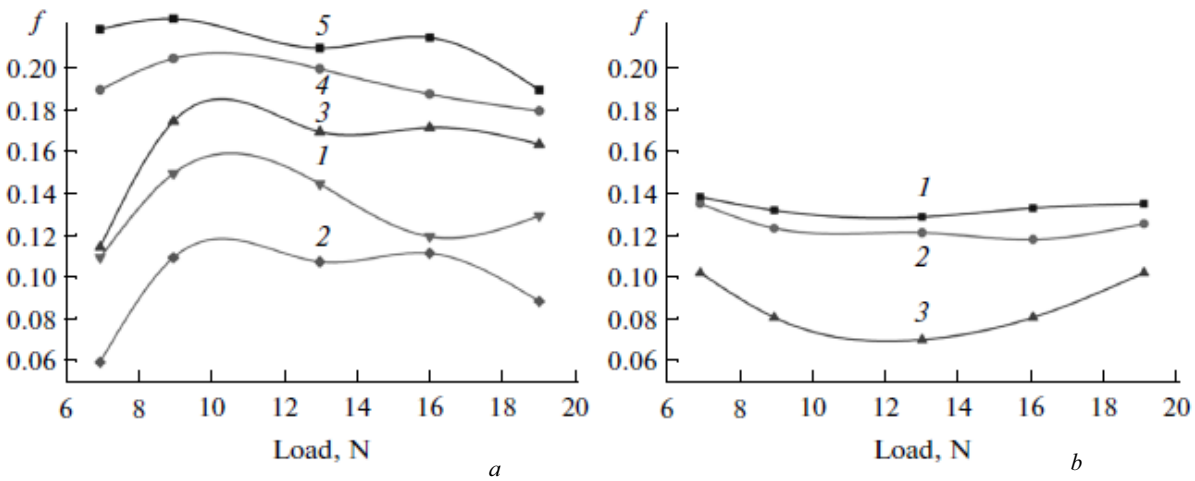


Fig. 4. Dependences of coefficient of friction on applied load at various concentrations of CuO, wt %:
a – after preliminary treatment in glow discharge: 1 (*1*); 2 (*2*); 4 (*3*); 0 (*4*);
and original UHMWPE (*5*); *b* – untreated: 1 (*1*); 2 (*2*); 3 (*3*)

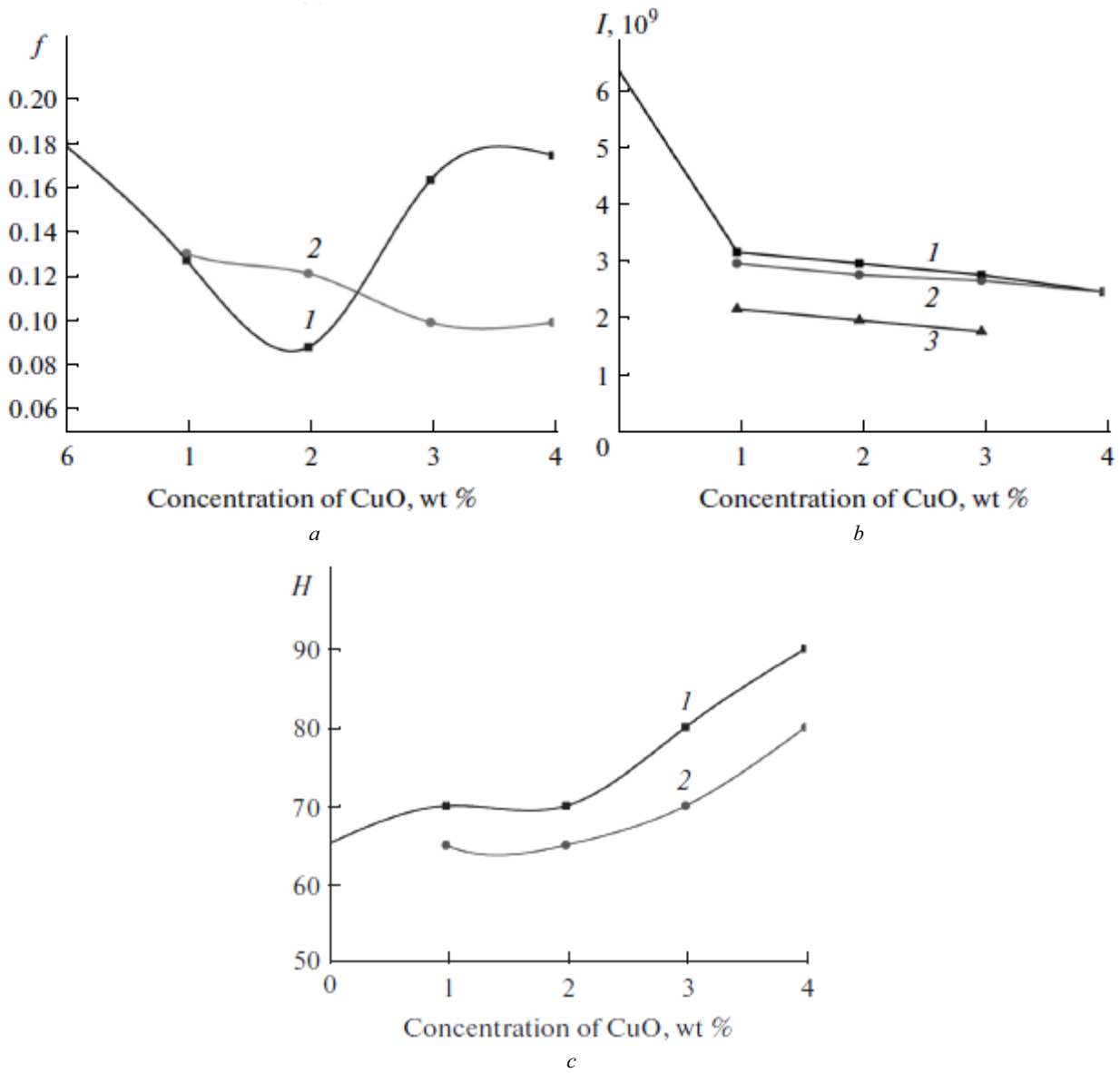


Fig. 5. Dependences of:
a – coefficient of friction; *b* – wear rate; *c* – microhardness on concentration of CuO under a load of 19 N: untreated (*1*); after preliminary treatment in glow discharge (*2*); calculated wear rate (*3*)

The calculation estimate of the wear rate of a nanocomposite material is based on considering numerous factors, such as the physicomechanical characteristics of the material of a surface being worn out, the parameters of the roughness of the rigid surface of the disc, the parameters that characterize the loading of the contact, and the frictional fatigue of the material.

An analysis of the results of this study has allowed us to assume that the parameters that govern the wear of the specimens of the polymer composite material are the contact pressure p, the coefficient of friction f, the hardness of the surface H, the average values of the maximum peak-to-valley height R, and the curvature radius of peaks r, as well as the parameters b and of the power approximation of the initial portion of the bearing ratio curve.

The wear rate I of the specimens of the PCs that were synthesized without preliminary ion treatment and contained 1–4 wt % CuO is satisfactorily described by the following analytical dependence (fig. 5, curve *3*) [14; 15]:

$$I = 11.3 \cdot 10^{-7} \left(\frac{R}{r \cdot b^{\frac{1}{\nu}}} \right)^{n} \cdot \frac{\left(p\sqrt{1+f^{2}} \right)^{0.5}}{H^{0.52}},$$

where the criterion $\left(\frac{R}{r \cdot b^{\frac{1}{\nu}}} \right)^{n} = 0.0158$ was obtained from the results of studying the parameters of the roughness of the disk friction surface using profilometry. It can be seen

from the data in fig. 5 that the calculated values of *I* nearly coincide with the experimental values.

Conclusion. The results of studying the effect of the vacuum plasma-arc modification of UHMWPE on the mechanical and tribological characteristics of the polymer composites are presented. It has been found that the deformation and strength characteristics of the NCs depend on the concentration of CuO; at concentrations of nanopowder of 1–2 %, a substantial influence of preliminary treatment in glow discharge is observed.

It has been established that, with an increase in the concentration of the filler, the wear rate decreases; at a concentration of CuO of up to 1 %, the wear rate drops sharply. The microhardness of the surface simultaneously increases. The wear rate, the microhardness, and the coefficient of friction of the specimens preliminarily treated in glow discharge are substantially lower. The results obtained can form a basis for developing compositions of polymers with nanofillers in order to produce polymer composite materials with the UHMWPE matrix and required characteristics.

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. Mashkov Yu. K., Ovchar Z. N., Baibaratskaya M. Yu., Mamaev O. A. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike* [Polymer Composite Materials in Tribology]. Moscow, OOO “Nedra-Biznestsentr” Publ., 2004, 262 p.

2. Miheev A. E., Chernyatina A. A., Evkin I. V., Vlasov A. Ju., Martynov V. A. [Feature Radiation Reflective Coating on a Sample of Polymer Composite Materials Technology with Transfer Molding]. *Vestnik SibGAU*, 2014, Vol. 56, No. 4, P. 236–242 (In Russ.).

3. Oxlopkova A. A., Andrianova O. A., Popov S. N. *Modifikatsiya polimerov ul'tradispersnymi soedineniyami* [Modification of Polymer by Superdispersed Compounds]. Yakutsk, Yakut Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2003, 222 p.

4. Jacobs T., Morent R., De Geyter N., Dubruel P., Leys C. Plasma Surface Modification of Biomedical Polymers: Influence on Cell-Material Interaction Plasma. *Chem Plasma Process*, 2012, Vol. 32, No. 5, P. 1039–1073. Doi:10.1007/s11090-012-9394-8.

5. Cui N. Y., Brown N. M. D. Modification of the surface properties of a polypropylene (PP) film using an air dielectric barrier discharge plasma. *Appl Surf Sci*, 2002, Vol. 189, No. 1-2, P. 31–38. Doi: 10.1016/S0169-4332(01)01035-2.

6. Ruan S. L., Gao P., Yang X. G., Yu T. X. Toughening high performance ultrahigh molecular weight toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes. *Polymer*, 2003, Vol. 44, No. 19, P. 5643–5654. Doi: 10.1016/S0032-3861(03)00628-1.

7. Brandl W., Marginean G., Chirila V., Warschewski W. Production and characterization of vapour grown carbon fibers/polypropylene composites. *Carbon*, 2004, Vol. 42, No. 1, P. 5–9. doi: 10.1016/j.carbon.2003.09.012.

8. Zoo V. S., An J. W., Lim D. Ph., Lim D. S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE. *Tribol. Lett*., 2004, Vol. 16, No. 4, P. 305–309. Doi: 10.1023/B:TRIL.0000015206.21688.87.

9. Vlasov A. Ju., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Investigation of the Curing Process of the Polymeric Binder Based on Their Dielectric Parameters when Creating a Dimensionally Stable Thin-walled Structures Stable to Negative Space Factors]. *Vestnik SibGAU*, 2014, Vol. 56, No. 4, P. 197–201 (In Russ.).

10. 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*, 2011, Vol. 35, No. 1, P. 7–11. Doi: 10.3103/S1068366614010103.

11. 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.

12. Fedorov L. Yu., Karpov I. V., Ushakov A. V., Lepeshev A. A. Influence of Pressure and Hydrocarbons on Carbide Formation in the Plasma Synthesis of TiC Nanoparticles. *Inorganic Materials*, 2015, Vol. 51, No. 1, P. 25–28. Doi: 10.1134/S0020168515010057.

13. Lipatov Yu. S. *Fizicheskaya khimiya napolnennykh polimerov* [Physical Chemistry of Filled Polymers], Moscow, Khimiya Publ, 1977, 304 p.

14. Kogaev V. P., Drozdov Yu. N. *Prochnost’ i iznosostoikost’ detalei mashin* [Strength and Wear Resistance of Machine Parts], Moscow, Vysshaya shkola publ., 1991, 319 p.

15. Kragelskii I. V., Mikhin N. M. Handbook of Friction Units of Machines, New York, ASME Press, 1988, 318 p.

Библиографические ссылки

1. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю. К. Машков [и др.] // М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 262 с.

2. Характеристика радиоотражающих покрытий на образцах из полимерных композиционных материалов, изготовленных по технологии трансферного формования / А. Е. Михеев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 236–242.

3. Охлопкова А. А., Андрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. Якутск : Якутское отделение РАН, 2003. 222 с.

4. Plasma Surface Modification of Biomedical Polymers: Influence on Cell-Material Interaction Plasma / T. Jacobs [et al.] // Chem Plasma Process. 2012. Vol. 32, no. 5. P. 1039–1073. Doi: 10.1007/s11090-012-9394-8.

5. Cui N. Y., Brown N. M. D. Modification of the surface properties of a polypropylene (PP) film using an air dielectric barrier discharge plasma // *Appl Surf Sci*.

2002. Vol. 189, no. 1–2. P. 31–38. Doi: 10.1016/S0169-4332(01)01035-2.

6. Toughening high performance ultrahigh molecular weight toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes / S. L. Ruan [et al.] // Polymer. 2003. Vol. 44, no. 19. P. 5643–5654. Doi: 10.1016/S0032-3861(03)00628-1.

7. Production and characterization of vapour grown carbon fibers/polypropylene composites / W. Brandl [et al.] // Carbon. 2004. Vol. 42, no. 1. P. 5–9. Doi: 10.1016/j.carbon.2003.09.012.

8. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE / V. S. Zoo [et al.] // Tribol. Lett. 2004. Vol. 16, no. 4. P. 305–309. Doi: 10.1023/B:TRIL.0000015206.21688.87.

9. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Исследование процесса отверждения полимерных связующих на основе анализа их диэлектрических параметров при создании тонкостенных формостабильных конструкций, устойчивых к негативным факторам космического пространства // Вестник СибГАУ. 2014. № 4 (56). С. 197–201.

10. 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. 2011. Vol. 35, no. 1. P. 7–11. Doi: 10.3103/S1068366614010103.

11. 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.

12. Influence of Pressure and Hydrocarbons on Carbide Formation in the Plasma Synthesis of TiC Nanoparticles / L. Yu. Fedorov [et al.] // Inorganic Materials. 2015. Vol. 51, no. 1. P. 25–28. Doi: 10.1134/S0020168515010057.

13. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров. М. : Химия, 1977. 304 с.

14. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М. : Высш. шк., 1991. 318 с.

15. Kragelskii I. V., Mikhin N. M. Handbook of Friction Units of Machines. New York : ASME Press, 1988. 318 p.

© Karpov I. V., Ushakov A. V., Lepeshev A. A., Fedorov L. Yu., Shaihadinov A. A., 2015

УДК 621

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 941–945

К ВОПРОСУ О СОСТОЯНИЯХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

П. А. Кузнецов[1*], Д. И. Ковалев[2], В. В. Лосев[1], А. О. Калинин[1]

[1]Сибирский государственный технологический университет
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: forubox@yandex.ru

Рассматривается надежность автоматизированных систем управления. Анализируется подход к классификации систем по состояниям работоспособности. Таким подходом может быть как традиционный бинарный подход, оперирующий понятием «исправность», так и иные варианты оценки состояния системы. Приводится один из таких вариантов, предусматривающий избирательную оценку элементов системы на предмет надежности системы в целом. Введено описание различных состояний систем автоматического управления и их элементов с точки зрения исправности и опасности, математический метод определения перехода объектов из состояния в состояние, их отличия друг от друга по выполнению целевой функции. Изучается взаимодействие элементов, находящихся в различных состояниях, совокупное состояние элементов, соединённых последовательно или параллельно. Приводятся таблицы логики разнообразных состояний и принципы их вычисления при последовательном и параллельном соединении. При помощи имитационного моделирования иллюстрируется предложенный подход путём нахождения вероятностей попадания в данные состояния системы параллельно и последовательно соединённых элементов, обладающих своими различными вероятностями перехода из состояния в состояние. В целом материалы статьи будут полезными при анализе надежности автоматизированных систем управления и проектировании высоконадежных систем. Таким образом, рассматриваемый механизм определения состояния системы дает более полную информацию о ней и позволяет обеспечить избирательный подход к надежности системы в целом. Детализация результатов при оценке надежности автоматизированных систем управления позволит проектировщику принимать обоснованное решение при проектировании средств повышения надежности.

Ключевые слова: надежность, состояния, исправность, работоспособность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 941–945

TO THE QUESTION ABOUT THE STATES OF WORKABILITY FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS WITH COMPLICATED STRUCTURE

P. A. Kuznetsov[1*], D. I. Kovalev[2], V. V. Losev[1], A. O. Kalinin[1]

[1]Siberian State Technological University
82, Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: forubox@yandex.ru

The article discusses the reliability of automated control systems. The approach to the classification systems for health States is analyzed. This approach can be traditional binary approach, operating with the concept of "serviceability", and other variants of estimation of the system state. This article provides such option, providing selective evaluation of components for the reliability of the entire system. The description of various automatic control systems and their elements from the point of view of health and risk, mathematical method of determining the transition object from state to state, their difference from each other in the implementation of the objective function are introduced. The interplay of elements in different States, the aggregate state of the elements connected in series or in parallel is explored. There are the tables of various logic States and the principles of their calculation in series and parallel connection. Through simulation the proposed approach is illustrated by finding the probability of getting into the system state data in parallel and serially connected elements, with their different probabilities of moving from state to state. In general, the materials of article will be useful for analyzing of the reliability of the automated control systems and engineering of the highly-reliable systems. Thus, this mechanism determined the State of the system

provides more detailed information about it and allows a selective approach to the reliability of the system as a whole. Detailed results when assessing the reliability of the automated control systems allow the engineer to make an informed decision when designing means of improving reliability.

Keywords: reliability, states, faultlessness, workability.

Введение. Надежность структурно-сложных систем автоматического управления – область исследований, которая обладает широким спектром возможных методов и принципов исследований и вычислений. В соответствии с традиционным подходом надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции [1–4].

Надежность каждого элемента можно выразить значением P_i – вероятности безотказной работы, а состояние – традиционно логической переменной S_i, принимающей значение 1 в случае исправности элемента и 0 в случае его неисправности.

Определяет же наступление состояния случайное событие, выражающееся числом R_i, принимающим случайное значение из интервала (0…1). Следовательно, для определения состояния возможно применить следующие выражения [5]:

$$S_i = 1, \text{ при } R_i < P_i, \quad (1)$$

$$S_i = 0, \text{ при } R_i > P_i. \quad (2)$$

И, собственно, состояние всей системы выражается путём вычисления логической формулы системы, аргументами которой будут состояния отдельных элементов. Такими состояниями привычно называются работоспособное и неработоспособное. Такой дуальный подход позволяет применять к расчету фактического состояния обыкновенную булеву логику.

Состояния системы с точки зрения опасности. Сам набор состояний отнюдь не является чем-то абсолютно верным и бесспорным. Представляется возможным расширить представление о состояниях элементов/системы. Ведь помимо привычных представлений о состоянии как исправно/неисправно, существуют и другие классификации состояний [6].

В соответствии с подходом безопасности систем, повышая надежность элементов, вводя структурную и временную избыточность, применяя взаимозаменяемость, восстанавливаемость и иные меры повышения надежности сложной системы, мы обеспечиваем отказоустойчивость. Но именно для сложных систем характерной является возможность многократных комбинаций отказов, каждая из которых невероятно мала, а в сумме таких невероятных состояний накапливается достаточно, чтоб система попала в опасное состояние – состояние, в котором возникает ущерб большого масштаба.

В проблеме безопасности на первый план выходят не учитываемые в теории надежности компоненты – среда, в которой функционирует система, защитные сооружения, неблагоприятные внешние воздействия, умышленные или безответственные действия людей. Чёткое знание условий возникновения этих неблагоприятных условий позволяет, с одной стороны, принять заблаговременно соответствующие меры защиты, а с другой – разработать безопасный алгоритм управления системой.

В работе [7] даны основные определения, которые используются нами при рассмотрении данного вопроса.

Но наряду с подходом, оценивающим состояния безопасности системы, множественность состояний может рассматриваться и при оценке исправности системы.

Система вычислений состояний. Для оперирования разнообразными состояниями необходимо применять специфическую систему вычислений, хотя она во многом будет основана на привычной булевой логике. Отличием предлагаемой системы будет большее число возможных значений переменных состояния.

Для иллюстрации универсальности данного подхода рассмотрим несколько состояний V_1, V_2, V_3, V_4, в которых может пребывать как система, так и отдельные её элементы.

Состояние V_1 – неработоспособное состояние. В данном состоянии элемент полностью не выполняет свою функцию, и все его параметры не соответствуют требуемым.

Состояние V_2 – неисправное. В нём элемент выполняет свою функцию, но с какой-то погрешностью, ошибкой.

Состояние V_3 – работоспособное. В нём соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкторской документации значения всех технических параметров элементов, качеств, характеризующих их способность выполнить заданные функции. Значения остальных параметров могут документации не соответствовать.

Состояние V_4 – исправное состояние. В нём элемент соответствует всем требованиям нормативно-технической и конструкторской документации [1; 8].

Элементы системы могут быть соединены различным образом. Сложность структуры системы может обеспечить повышение её надёжности путём применения принципа резервирования. Под резервированием понимается применение определенных технических средств с целью обеспечения работоспособности объекта при отказе [9]. В системах с резервированием выделяют основной и резервный элементы: первый представляет собой элемент структуры объекта, отказ которого при отсутствии резервирования приводит к потере работоспособности объекта, второй – элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента [10; 11].

Таблицы состояний последовательных и параллельных элементов. Исходя из вышесказанного, опишем, как взаимодействуют различно соединённые элементы.

При последовательном соединении логическая функция будет подобна конъюнкции элементов (табл. 1):

Таблица 1

Таблица состояний последовательно соединённых элементов

S_1	S_2	S_1 и S_2
V_1	V_1	V_1
V_1	V_2	V_1
V_1	V_3	V_1
V_1	V_4	V_1
V_2	V_1	V_1
V_2	V_2	V_2
V_2	V_3	V_2
V_2	V_4	V_2
V_3	V_1	V_1
V_3	V_2	V_2
V_3	V_3	V_3
V_3	V_4	V_3
V_4	V_1	V_1
V_4	V_2	V_2
V_4	V_3	V_3
V_4	V_4	V_4

При параллельном – дизъюнкции (табл. 2), заметим, что для верной работы системы необходимы дополнительные элементы, определяющие состояния элементов, схемы «голосования» [12; 13].

Таблица 2

Таблица состояний параллельно соединённых элементов

S_1	S_2	S_1 или S_2
V_1	V_1	V_1
V_1	V_2	V_2
V_1	V_3	V_3
V_1	V_4	V_4
V_2	V_1	V_2
V_2	V_2	V_2
V_2	V_3	V_3
V_2	V_4	V_4
V_3	V_1	V_3
V_3	V_2	V_3
V_3	V_3	V_3
V_3	V_4	V_4
V_4	V_1	V_4
V_4	V_2	V_4
V_4	V_3	V_4
V_4	V_4	V_4

Каждый элемент системы может переходить из состояния в состояние с определённой вероятностью. Поэтому расчет надежности системы может выполняться как по уже имеющимся состояниям, так и по вероятностям попадания элементов в данные состояния.

Пример расчёта состояния соединения элементов. Проиллюстрируем пример расчета (см. рисунок), рассмотрев систему, состоящую из неких элементов M_1, M_2, M_3, соединяемых последовательно и параллельно.

В случае применения к рассмотрению более чем двух состояний системы, расчет вероятности пребывания системы в них выполняется для каждого состояния. Поэтому необходимо получить и применять в расчете вероятности попадания в каждое состояние каждого элемента. Сведём их в табл. 3.

Таблица 3

Вероятности пребывания элементов в определённых состояниях

	P_{s1}	P_{s2}	P_{s3}	P_{s4}
M_1	0,001	0,05	0,45	0,4990
M_2	0,0001	0,02	0,5	0,4799
M_3	0,0005	0,03	0,6	0,3695

Здесь P_{sn} – вероятность состояния n.

Аналитически вероятность попадания системы в любое состояние $P_{общ}$ выражается формулой

$$P_{общ} = (1 - (1 - P_{m1})^2 \cdot (1 - P_{m2}^{\ 2})) \cdot (1 - (1 - P_{m3})). \quad (3)$$

В результате вычислений получаем следующие значения (табл. 4):

– вероятность неработоспособности системы 0,000002;

– вероятность неисправности системы 0,00578;

– вероятность только работоспособности системы 0,4838;

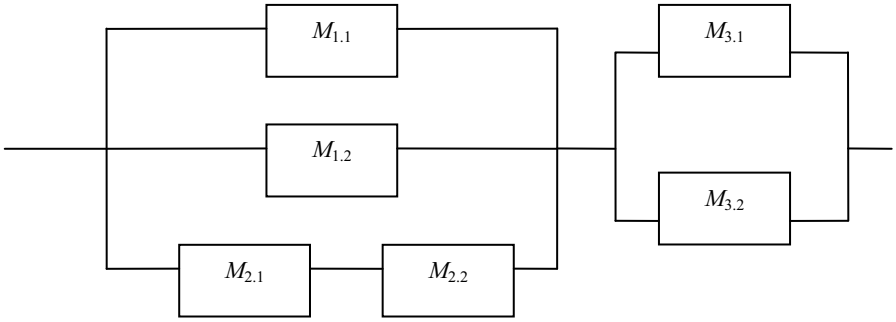
– вероятность исправности системы 0,5104.

Таблица 4

Вероятности пребывания системы в состояниях

P_{s1}	P_{s2}	P_{s3}	P_{s4}
0,000002	0,005784	0,483825	0,5104

Для иллюстрации взаимодействия состояний системы проведём имитационное моделирование, сгенерировав набор случайных состояний [14; 15].



Структура системы

Таблица 5

Результаты имитационного моделирования состояний

Состояние $M_{1.1}$	Состояние $M_{1.2}$	Состояние $M_{2.1}$	Состояние $M_{2.2}$	Состояние $M_{3.1}$	Состояние $M_{3.2}$
2	3	4	3	2	3

Особенность рассматриваемой логики в том, что над значениями состояний, кроме логических, можно выполнять ещё и математические вычисления. В процессе генерации мы разбиваем промежуток от нуля до единицы на четыре вложенных интервала и увеличиваем счётчик при попадании элемента в каждый интервал. Сгенерировав набор, рассчитаем сочетание состояний в соответствии с нашей логикой (табл. 5).

Логическая функция системы имеет вид

$$(M_{1.1} \vee M_{1.2} \vee (M_{2.1} \wedge M_{2.2})) \wedge (M_{3.1} \vee M_{3.2}), \quad (4)$$

$$M_{2.1} \wedge M_{2.2} = V_4 \wedge V_3 = V_3, \quad (5)$$

Параллельно соединённые элементы M_2 будут в состоянии V_3, работоспособном:

$$M_{1.1} \vee M_{1.2} \vee (M_{2.1} \wedge M_{2.2}) = V_2 \vee V_3 \vee V_3 = V_3. \quad (6)$$

Первое параллельное соединение – тоже в работоспособном состоянии:

$$M_{3.1} \vee M_{3.2} = V_2 \vee V_3 = V_3. \quad (7)$$

Второе параллельное соединение – тоже в работоспособном состоянии.

И, в свою очередь:

$$(M_{1.1} \vee M_{1.2} \vee (M_{2.1} \wedge M_{2.2})) \wedge (M_{3.1} \vee M_{3.2}) = \\ = V_3 \wedge V_3 = V_3. \quad (8)$$

Вся система будет в работоспособном состоянии.

Заключение. Подобный дифференцированный подход к надежности обладает многими преимуществами. Во-первых, традиционный подход, определяющий только два состояния системы – рабочее и нерабочее, слишком груб. Зная, что система находится в рабочем состоянии, мы приобретаем чувство уверенности в ней, которое часто бывает ложным, так как при рабочем состоянии системы мы не знаем, соответствуют ли нормам нефункциональные параметры, зачастую определяющие многие показатели системы.

А разделение рабочего состояния на работоспособное и исправное позволяет наглядно увидеть, будет ли система вероятнее всего поддерживать все свои параметры или только параметры, характеризующие способность выполнить заданные функции.

Во-вторых, появляется возможность более подробного рассмотрения состояний. Избирательность в подходе к работоспособности системы позволяет точнее выбрать желательные её элементы и, в последующем, предполагаемое состояние системы. Ведь зачастую системы подразделяются по своей важности в широких пределах, и определённое состояние может быть неудовлетворительным для одной системы, к примеру, системы управления космическим аппаратом, но удовлетворительным для другой, например бытовой системы.

Таким образом, введённое нами определение состояния системы даёт более полную информацию о ней и позволяет обеспечить избирательный подход к надежности системы в целом.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем : учебник для студентов вузов. М. : Логос, 2001. 206 с. Сер. «Учебник XXI века».
3. Надежность технических систем. Учебное пособие для студентов технических специальностей вузов / Е. В. Сугак [и др.] ; под общ. ред. Е. В. Сугака и Н. В. Василенко. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2000. 608 с.
4. Лосев В. В. Надежностный анализ АСУ ТП // Вестник университетского комплекса : сб. научн. тр. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ, 2008. Вып. 11 (25). С. 16–19.
5. К вопросу оценки надежности АСУ с блокирующими модулями защиты / И. В. Ковалев [и др.] // Приборы. 2013. № 6. С. 20–24.
6. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. 276 с.
7. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУ ТП: проектирование и разработка : учеб.-практ. пособие. М. : Инфра-инженерия, 2015. 929 с.
8. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rgost.ru/.
9. Кузнецов П. А. К вопросу анализа эффективности систем с полным резервированием // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 326–331.
10. Модификация метода Волковича–Михалевича с целью оптимизации затрат при синтезе отказоустойчивых информационно-вычислительных систем / П. А. Кузнецов [и др.] // Вестник СибГАУ. 2012. № 6(46). С. 97–100.
11. Кузнецов П. А. Зависимые отказы в многофункциональных автоматизированных системах управления // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 86–91.
12. Петрокас Л. В. Теория машин-автоматов и пневмогидроприводов. М. : Машиностроение, 1970. 334 с.
13. Словарь по кибернетике / под ред. В. С. Михалевича. 2-е изд. Киев : Гл. ред. укр. сов. энцикл. им. М. П. Бажана, 1989. 751 с.
14. А. Акопов. Имитационное моделирование : учебник и практикум. М. : Юрайт, 2015. 390 с.
15. Паньгина Н. Н., Паньгин А. А. Статистическое моделирование. Метод Монте-Карло // Компьютерные инструменты в образовании. 2002. № 5. С. 30–43.

References

1. 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.

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

3. Sugak E. V, Vasilenko N. V. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem.* [Reliability of technical systems]. Krasnoyarsk, NII SUVPT Publ., 2000, 608 p.

4. Losev V. V. [Reliability analysis of ACS]. *Vestnik universitetskogo kompleksa: Sb. nauchn. tr*. 2008, Vol. 11(25), P. 16–19 (In Russ.).

5. 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.).

6. 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.

7. Fedorov Yu. N. *Spravochnik inzhenera po ASU TP: Proektirovanie i razrabotka.* [PCS engineer reference: Design and development] Moscow, Infra-inzheneriya Publ., 2015, 929 p.

8. *GOST 27.002–89 Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [State Standard 27.002-89. Reliability in the technology. Basic concepts. Terms and Definitions]. Available at: http://vsegost.com/Catalog/11/11290.shtml (accessed 12.02.2015).

9. Kuznetsov P. A. [On the analysis of the effectiveness of fully redundant systems]. *Vestnik SibGAU,* 2015, Vol. 16, No. 2, P. 326–331 (In Russ.).

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

11. Kuznetsov P. A. [Dependant failures in multifunctional ACS]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 1, P. 86–91 (In Russ.).

12. Petrokas L. V. *Teoriya mashin-avtomatov i pnevmogidroprivodov* [Theory of automated machines and pneumatic drives] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 334 p.

13. *Slovar' po kibernetike* [Cybernetics dictionary]. Ed. V. S. Mikhalevich. Kiev, Glav. red. Ukr. Sov. Entsiklopedii im. M. P. Bazhana Publ., 1989, 751 p.

14. Akopov A. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation]. M. : Jurayt Publ., 2015, 390 p.

15. Pan'gina N. N., Pan'gin A. A. [Statistical modeling. Monte-Carlo method]. *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii.* 2002, No. 5, P. 30–43 (In Russ.).

© Кузнецов П. А., Ковалев Д. И.,
Лосев В. В., Калинин А. О., 2015

УДК 678-465

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 946–951

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА РЕФЛЕКТОРА

О. А. Куприянова*, А. Ю. Власов, К. А. Пасечник, А. М. Арзамаскина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: kupriyanova1809@gmail.com

Предлагается методика оценки качества рефлектора антенны для космических систем связи. Условием для применения методики является нахождение значений среднеквадратического отклонения геометрии поверхности рефлектора и коэффициента радиоотражения в заданных допусках. После выполнения указанного условия проводится контроль остальных параметров рефлектора согласно приведенной номенклатуре показателей качества. Номенклатура составлена на основании требований нормативной и технической документации на изделие и включает основные характеристики, влияющие на работоспособность устройства.

Методика заключается в расчете комплексного показателя качества изделия. Комплексный показатель качества определяется с помощью дифференциального метода, заключающегося в сопоставлении фактического и базового (эталонного) значений параметров рефлектора согласно предложенной номенклатуре. В расчетах используются фактические значения показателей, собранные в результате контроля и испытаний изделия. Итоговая формула комплексного показателя качества позволяет получить значение уровня качества изделия для объективной оценки результата технологического процесса.

Для сравнительной оценки комплексного показателя качества между изделиями одной партии предлагается шкала категорий оценок, основанная на принципе ABC-анализа и правиле Парето и состоящая из трех категорий.

Данный показатель является количественной оценкой качества рефлектора и может использоваться в дальнейшем для анализа и управления технологическим процессом изготовления изделий.

В дополнение к методике приведен пример расчетов и оценки уровня качества для рефлектора Ku-частотного диапазона для космических систем связи из полимерного композиционного материала. Применение разработанной методики является важным условием обеспечения гарантированной оценки уровня качества рефлектора, совершенствования технологии и предотвращения появления бракованных изделий.

Ключевые слова: контроль, управление качеством, рефлектор, методика оценки.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 946–951

DETERMINATION OF THE COMPLEX INDEX FOR REFLECTOR QUALITY LEVEL ASSESSMENT

O. A. Kupriyanova*, A. Yu. Vlasov, K. A. Pasechnik, A. M. Arzamaskina

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: kupriyanova1809@gmail.com

The paper proposes an antenna reflector's quality assurance method for space communication systems. It requires meeting a specified condition for the method's application, which includes matching the tolerance by the standard deviation of reflector surface geometry and reflection coefficient values. After meeting the condition control of other reflector parameters from listed quality indices nomenclature can be permitted. The nomenclature is based on requirements of standard and technical product documentation and including device working ability's base characteristics.

The method consists of complex quality index calculation. Complex quality index can be calculated by using differential method, comprising in a comparison between real and standard (ideal) values of reflector parameters from the listed nomenclature. The actual data for the calculation are collected during quality control and testing. The summary formula of the complex quality index is introduced for the purposes of determining the product quality level value for impersonal technological process evaluation.

For comparative assessment of complex quality index within a single production lot, this paper proposes rating scale categories based on ABC analysis and Pareto principles and includes three categories.

This index is a quantitative estimate of reflector quality and can be used for further analysis purposes and managing of production manufacture's technological process.

In addition to the method implementation example of the calculation algorithm for space receiver system reflector from polymer composite material of Ku-frequency is demonstrated. The developed method application is a crucial precondition for quality assessment level of reflector, technology improvement and for defective products prevention.

Keywords: control, quality management, reflector, assessment method.

Введение. В настоящей работе продолжена серия исследований по моделированию, параметризации и контролю рефлекторов антенн [1–4]. На данном этапе целью является разработка системы показателей и оценка готового изделия на соответствие установленным требованиям.

Согласно стандарту ГОСТ 15467 уровень качества продукции – это «относительная характеристика качества продукции, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей». Его оценка позволяет относительным методом установить степень совершенства достигнутого результата по отношению к эталонному образцу изделия. Определение уровня качества осуществляется на основе собранной в результате контроля информации по утвержденной номенклатуре показателей, целью данного процесса является получение максимально объективной оценки качества изделия.

В рамках данной работы проведено составление номенклатуры показателей рефлекторов антенн и предоставление методики определения уровня качества изделия посредством расчета комплексного показателя качества (КПК) [5], не зависящей от типа материала, геометрических параметров, исполнения рефлектора и т. д.

Определяющий показатель качества. Определяющий показатель качества согласно ГОСТ 15467 – это «показатель качества продукции, по которому принимают решение оценивать ее качество». В отношении рефлекторов определяющими показателями [6–11] являются среднеквадратическое отклонение геометрии рабочей поверхности и коэффициент радиоотражения, поскольку это основные функциональные показатели изделия. Оценив данные параметры и установив их соответствие нормативным, можно приступать к определению КПК.

Методика оценки уровня качества. Для оценки технического уровня качества рефлектора [12–16] требуется установить номенклатуру единичных показателей качества изделия на основании требований, собранных из нормативной и технической документации на изделие. Полученный перечень показателей структурирован в соответствии с классификацией показателей и приведен в форме дерева показателей качества продукции в табл. 1.

Таблица 1

Дерево показателей качества рефлектора

0 уровень	1 уровень	2 уровень	3 уровень
Комплексный показатель качества	1. Функциональные	1.1. Масса	
		1.2. Шероховатость поверхности	
		1.3. Плотность	
		1.4. Пористость	
		1.5. Эффективная площадь рассеяния	
		1.6. Собственная частота колебаний	
	2. Надежности	2.1. Устойчивость к внешним климатическим воздействиям (ВКВ)	2.1.1. Повышенной температуры
			2.1.2. Пониженной температуры
			2.1.3. Повышенного избыточного давления
			2.1.4. Пониженного давления
			2.1.5. Динамическое воздействие пыли/песка
			2.1.6. Воздействие инея
			2.1.7. Относительной влажности
			2.1.8. Солнечной радиации
			2.1.9. Ветровой нагрузки
			2.1.10. Атмосферных осадков
		2.2. Устойчивость к механическим воздействиям (МВ)	2.2.1. Предел прочности при сдвиге
			2.2.2. Предел прочности при сжатии
			2.2.3. Предел прочности при поперечном изгибе
			2.2.4. Модуль упругости при поперечном изгибе
			2.2.5. Модуль упругости при растяжении $E^{и}$
			2.2.6. Предел прочности при растяжении σ_E
		2.3. Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР)	

На нулевом уровне дерева находится КПК, т. е. обобщенная количественная оценка уровня качества изделия. Он формируется исходя из показателей первого уровня, которые, в свою очередь, включают в себя группы второго уровня и третьего соответственно.

Метод расчета комплексных показателей. Для последующих расчетов значений показателей, в соответствии с их определением, в большинстве случаев применим дифференциальный метод [17], основывающийся на сопоставлении фактического уровня и базового (эталонного), установленного в технической документации:

1. В случае, если задан диапазон допустимых значений $P_{\min} \le P_i \le P_{\max}$, то значение показателя определяем по формуле

$$K_i = 1 - \frac{(P_i - P_{\text{ñd}})^2}{(0,5ITP + \Delta)^2},$$

где $P_{\text{ср}}$ – середина диапазона допустимых значений; ITP – допуск на размер ($P_{\max} - P_{\min}$); Δ – погрешность измерения параметра.

При соответствии $P_i = P_{\text{ср}}$ значению показателя присваивается 1.

2. В случае, если задано максимальное допустимое значение $P_i \le P_{\max}$, но не указано минимальное, то расчет показателя осуществляется по формуле

$$K_i = 1 - \frac{(P_i - P_{\min})^2}{(ITP + \Delta)^2},$$

где $P_{\min}$ – минимально допустимое значение параметра, полученное в данном технологическом процессе.

3. В случае, если задано минимально допустимое значение $P_i \ge P_{\min}$, но не указано максимальное, то расчет показателя проведем по формуле

$$K_i = 1 - \frac{(P_{\max} - P_i)^2}{(ITP + \Delta)^2},$$

где $P_{\max}$ – максимально достижимое значение параметра, полученное в данном технологическом процессе.

Для расчета комплексного сводного ($K_{\text{св}}$) показателя качества применим коэффициент качества В. А. Трапезникова [18]:

$$\text{К}_{\text{св}} = \prod_{i=1}^{n} K_i,$$

где n – количество показателей качества в группе; i – порядковый номер показателя качества.

Данная формула обладает свойством «вето», сводя в ноль КПК при несоответствии хотя бы одного из показателей требованиям. Однако данная формула при большом количестве переменных снижает итоговое значение коэффициента, в связи с чем необходимо дополнить ее:

$$\text{К}_{\text{св}} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} K_i}.$$

Данная формула применяется для расчета комплексных показателей второго и третьего уровня, а также итогового комплексного показателя:

$$\text{КПК} = \sqrt[4]{(\sqrt[6]{\prod K_1} \cdot \sqrt[10]{\prod K_{2.1}} \cdot \sqrt[6]{\prod K_{2.2}} \cdot K_{2.3})}.$$

Полученная формула отражает общий ход расчета уровня качества рефлектора, исходя из заданных показателей.

Таким образом, имея количественные значения показателей качества рефлектора, собранные в процессе контроля, возможно получение комплексной оценки уровня качества изделия и сопоставление его с эталонным. Эталонный КПК равен единице.

Управление качеством производства рефлекторов. Для сравнительной оценки итогового КПК предлагается принять диапазоны значений допускаемого уровня качества. За основу деления оценок на категории взят принцип ABC-анализа, который в приложении к данной ситуации интерпретируется следующим образом: наиболее качественные изделия из партии составляют 20 % (категория 1), промежуточная категория 2 содержит следующие 30 %, а категория 3 – остальные 50 % изделий.

Данный подход является разновидностью широко известного правила Парето 80/20 [19], повсеместно применяемого в статистическом анализе. Рассматривая в совокупности эти два подхода, основанных на теории о степенном распределении вероятностей, можно распределить категории оценок, как представлено в табл. 2.

Первая категория в данном ранжировании является целевой для системы управления качеством.

Пример расчета КПК рефлектора Ku-диапазона из полимерных композиционных материалов. Данные для расчетов приведены в табл. 3. Номинальные значения приняты из технического задания на изделие и нормативной документации. Относительный показатель рассчитан согласно приведенным выше формулам.

Диаграмма комплексных показателей качества групп показателей приведена на рисунке.

Таблица 2

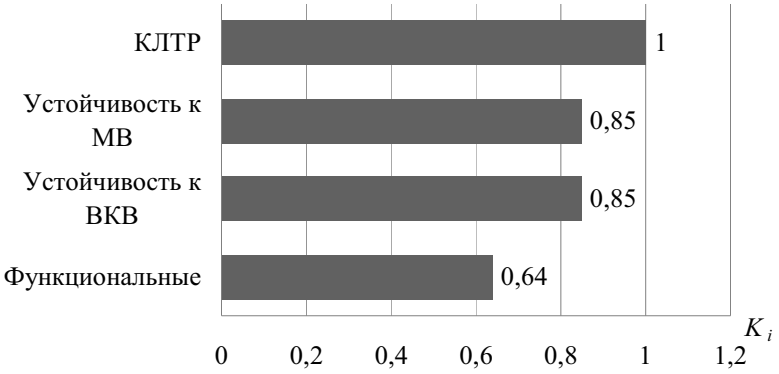
Ранжирование оценок уровня качества

Категория	Значение КПК	Оценка уровня качества
1	≥ 0,8	Отлично
2	0,5 < КПК < 0,8	Удовлетворительно
3	≤ 0,5	Неудовлетворительно

Таблица 3

Данные по результатам контроля для расчетов комплексного показателя качества

Показатель	Номинальное значение	Фактическое значение	Относительный показатель
1.1. Масса, кг	0,140 ± 5 %	0,146	0,43
1.2. Шероховатость поверхности, Ra	≤ 0,05	0,02	0,98
1.3. Плотность, г/см^3	1,86 ± 0,05	1,88	0,84
1.4. Пористость, %	≤ 3,5	2,1	0,82
1.5. Эффективная площадь рассеяния, м^2	0,035–0,49	0,08	0,35
1.6. Собственная частота колебаний, Гц	≥ 60	62	0,69
2.1.1. Повышенной температуры, °С	≥ +140	+160	0,91
2.1.2. Пониженной температуры, °С	Равно ниже –160	–173	0,87
2.1.3. Повышенного избыточного давления	≤ 0,20 СКО	0,12	0,96
2.1.4. Пониженного давления	≤ 0,14 СКО	0,07	0,95
2.1.5. Динамическое воздействие пыли/песка	≤ 0,14 СКО	0,05	0,98
2.1.6. Воздействие инея	≤ 0,14 СКО	0,09	0,89
2.1.7. Относительной влажности, %	98 ± 2 %	98	1
2.1.8. Солнечной радиации, Вт/м^2	≥ 1120	1140	0,43
2.1.9. Ветровой нагрузки	≤ 0,04 СКО	0,04	0,75
2.1.10. Атмосферных осадков	≤ 0,04 СКО	0,02	0,97
2.2.1. Предел прочности при сдвиге, МПа	80–120	91,2	0,80
2.2.2. Предел прочности при сжатии, ГПа	≥ 2	4,23	0,85
2.2.3. Предел прочности при поперечном изгибе, ГПа	≥ 0,88	0,92	0,89
2.2.4. Модуль упругости при поперечном изгибе, ГПа	40–43	41,6	0,99
2.2.5. Модуль упругости при растяжении, ГПа	70,5–73	71,8	0,99
2.2.6. Предел прочности при растяжении, ГПа	≥ 4	5,6	0,62
2.3. Коэффициент линейного теплового расширения, 1/К	$(1,5–1,65)\cdot10^{-6}$	$(1,5–1,65)\cdot10^{-6}$	1



Сравнение групповых комплексных показателей

По результатам расчетов получен КПК уровня качества рефлектора, равный 0,82, что соответствует 1 категории и уровню качества «отлично».

Сравнительный анализ эталонных КПК. Для сопоставления уровня качества идентичных эталонных изделий, отличающихся технологическим процессом изготовления, достаточно будет завысить требования к допускаемым нормативным значениям наиболее ответственных показателей. Ужесточение допусков к ряду параметров понизит расчетное значение итогового КПК и позволит сравнить эталонные изделия.

Заключение. Полученная методика оценки уровня качества рефлектора позволяет рассчитать комплексный показатель качества изделия исходя из предложенной номенклатуры показателей, а также результатов контроля и испытаний, объективно оценить уровень качества изделия и способствует дальнейшему

повышению эффективности производства. Значение КПК требуется для сравнительной оценки соответствия изделия эталону и статистического анализа технологического процесса.

Предоставленный пример расчета КПК наглядно иллюстрирует методику и интерпретацию результатов.

Количественная оценка уровня качества согласно данной методике необходима для целей комплексного управления соответствием продукции и является основным этапом в рамках модели обеспечения качества на предприятии.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, № 02.G25.31.0043.

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, № 02.G25.31.0043.

Библиографические ссылки

1. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Определение диапазонов изменения ключевых параметров, обеспечивающих стабильность технологического процесса производства изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов методом RTM // Вестник СибГАУ. 2014. № 4(56). С. 202–208.

2. Куприянова О. А., Сержантова М. В., Банщикова М. Н. Параметры контроля качества производства композитных рефлекторов антенн // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. № 8. С. 324–330.

3. Лопатин А. В., Пасечник К. А., Власов А. Ю. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: конечно-элементное моделирование конструкции // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 73–78.

4. Власов А. Ю., Филенкова Н. В., Кравчук Д. В. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: система адаптивного управления технологическим процессом // Вестник СибГАУ. 2013. № 3 (49). С. 166–168.

5. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М., 1979. 22 с.

6. Гайдачук В. Е., Кондратьев А. В., Омельченко Е. В. Анализ технологических дефектов, возникающих в серийном производстве интегральных авиаконструкций из полимерных композиционных материалов // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 3 (70). С. 11–20.

7. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. В 2 ч. Ч. 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 4. 18 с.

8. Мурашов В. В., Румянцев А. Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. В 2 ч. Ч. 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика. 2007. № 5. 19 с.

9. Шершак П. В. Особенности обеспечения контроля специальных технологических процессов производства изделий из полимерных композиционных материалов // Метрологическое обеспечение испытаний и измерений в авиационно-космической промышленности : сб. докладов Всерос. науч.-техн. конф. (22–23 окт. 2013, г. Москва). 6 с.

10. Hartmann J., Habersack J., Steiner H. J. Analysis and Measurement of Reflector Antennas in the MM-Wave Frequency Range // INICA ’07 2nd International ITG Conference Antennas, 2007. P. 41–44.

11. Коваленко В. А. Анализ механических дефектов и отклонений в соотношениях и свойствах полимерных композиционных материалов для авиакосмической техники // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2012. № 4. 57–64 с.

12. Гайдачук В. Е., Коваленко В. А. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. № 6. С. 5–12.

13. Коваленко В. А. Показатели качества этапов жизненного цикла конструкций ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2011. № 50. С. 128–140.

14. Коваленко В. А. Исследование технологических дефектов, возникающих в производстве агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1. Допуски на отклонения толщины формируемого изделия от проектного значения // Авиационно-космическая техника и технология. 2012. № 3(90). С. 10–21.

15. Gorobets N. N., Kiyko, V. I., Gorobets V. N. Dependence of the lateral and cross-polarized radiation reflector antennas on their size and focal length // Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2013 : IX Intern. Conf. 2013. P. 434–437.

16. ГОСТ Р 54072–2010. Изделия космической техники. Материалы композиционные полимерные. Номенклатура показателей. М., 2011. 11 с.

17. Радкевич Я. М., Радкевич Д. Я. Качество горной техники и технологических процессов ее изготовления. Оценка качества изготовления деталей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 8. С. 144–145.

18. Микроэкономическая статистика / С. Д. Ильенкова [и др.]. М., 2004. 544 с.

19. Чернавский Д. С., Никитин А. П., Чернавская О. Д. О возникновении распределения Парето в нелинейных динамических системах // Биофизика. 2008. № 2(53). С. 351–358.

References

1. Vlasov A. Yu., Pasechnik K. A., Martynov V. A. [Determination of the range of changes in key parameters, ensuring stability production process of complex shapes of polymer composites by method RTM]. *Vestnik SibGAU.* 2014, No. 4 (56), P. 202–208 (In Russ.).

2. Kupriyanova O. A., Serzhantova M. V., Banschikova M. N. [Quality Control Parameters of Manufacturing Composite Antenna Reflector]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2015, No. 8 (In Russ.). P. 324–330.

3. Lopatin A. V., Pasechnik K. A., Vlasov A. Yu., Shatov A. V. [Development of composite precision satellite reflector: Finite element construction modeling]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 3(49), P. 73–78 (In Russ.).

4. Vlasov A. Yu., Filenkova N. V., Kravchuk D. E. [Development of the precision satellite reflectors of polymeric composite materials: Adaptive control system of manufacturing process]. *Vestnik SibGAU.* 2013, No. 3(49), P. 166–168 (In Russ.).

5. *GOST 15467–79. Upravlenie kachestvom produktsii. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [Standard 15467–79. Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions]. Moscow, 1979. 22 p.

6. Gajdachuk V. E., Kovalenko V. A., Omelchenko E. V. [The analysis of the technological defects arising in a series production of integrated airframes made from polymeric composite materials]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya.* 2010, No 3(70), P. 11–20 (In Russ.).

7. Murashov V. V., Rumyantsev A. F. [Defects in solid parts and multilayered structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 1. Defects in solid parts and multilayered structures made of polymeric composite materials]. *Kontrol'. Diagnostika.* 2007, No. 4, 18 p. (In Russ.).

8. Murashov V. V., Rumyantsev A. F. [Defects in solid parts and multilayered structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 2. Methods for defects detection in solid parts and multilayered structures made of polymer composite materials]. *Kontrol'. Diagnostika.* 2007, No. 5, 19 p. (In Russ.).

9. Shershak P. V. [Features for ensuring control of special technological processes of polymeric composite materials products manufacturing] *Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Metrologicheskoe obespecheniya ispytaniy i izmereniy v aviatsionno-kosmicheskoy promyshlennosti"* [Metrological support of testing and measurements in aerospace industry]. Moscow, 2013, 6 P.

10. Hartmann J., Habersack J., Steiner H. J. Analysis and Measurement of Reflector Antennas in the MM-Wave Frequency Range. *INICA '07 2nd International ITG Conference Antennas*, 2007, P. 41–44. Doi: 10.1109/INICA.2007.4353928.

11. Kovalenko V. A. [Analysis of mechanical defects and variations in the proportions and properties of polymer composites]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatel'nykh apparatov.* 2012, No, 4, P. 57–64 (In Russ.).

12. Gaydachuk V. E., Kovalenko V. A. [Levels of structural defects that arise during manufacturing products made of polymeric composite materials]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya.* 2012, No. 6, P. 5–12 (In Russ.).

13. Kovalenko V. A. [Indicators of quality throughout the lifecycle of structures rocket and space technology polymer composite materials]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii.* 2011, No. 50, P. 128–140 (In Russ.).

14. Kovalenko V. A. [Researching of defects resulting in production aggregates of rocket and space technology made of polymeric composite materials. Report 1. Tolerance of molded products thickness from project value]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya.* 2012, No 3(90), P. 10–21 (In Russ.).

15. Gorobets N. N., Kiyko, V. I., Gorobets V. N. Dependence of the lateral and cross-polarized radiation reflector antennas on their size and focal length. *Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2013 IX International Conference*, 2013, P. 434–437. Doi: 10.1109/ICATT. 2013.6650803.

16. *GOST R 54072-2010. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Materialy kompozitsionnye polimernye. Nomenklatura pokazateley* [State Standard R 54072–2010. Space technology products. Polymer composites. List of indices]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 11 p.

17. Radkevich Ya. M., Radkevich D. Ya. [Mining equipment and manufacturing processes quality. Quality assessment of manufacturing parts]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1999, No. 8, P. 144–145 (In Russ.).

18. Il'enkova S. D. *Mikroekonomicheskaya statistika* [The microeconomic statistics]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2004, 544 p.

19. Chernavskiy D. S., Nikitin A. P., Chernavskaya O. D. [On emergence of Pareto distribution in complex dynamical systems]. *Biophysics*. 2008, No. 2(53), P. 351–358 (In Russ.).

© Куприянова О. А., Власов А. Ю.,
Пасечник К. А., Арзамаскина А. М., 2015

УДК 621.793

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 952–957

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛИЗАТОРА ЭМ-17

А. Е. Михеев*, С. С. Ивасев, А. В. Гирн, М. Н. Драганюк, Т. В. Трушкина

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

Предложена усовершенствованная конструкция распылительного устройства электродугового металлизатора. В результате компьютерного моделирования с использованием пакета SolidWorks Flow Simulation был проведён газодинамический анализ процесса напыления на электродуговом металлизаторе ЭМ-17 с целью анализа факторов, влияющих на процесс распыления. Были выявлены недостатки промышленного электрометаллизатора (большой угол распыла, низкая скорость и нестабильность потока) и предложены его конструктивные изменения. Была разработана усовершенствованная конструкция распылительного устройства, в которой предложено использовать сопло со спутным, сжимающим основную струю, потоком воздуха. Для подтверждения теоретических исследований был изготовлен экспериментальный образец распылительного устройства усовершенствованной конструкции. В ходе проведенных испытаний было установлено, что угол распыла снизился с 45°–60° до 15°–20°, истечение газодинамического потока стало более стабильным и равномерным. Сравнительный анализ производительности напыления показал, что при работе усовершенствованного металлизатора она увеличилась в среднем на 25 %. Проведены сравнительные экспериментальные исследования по напылению различных материалов. В результате были выявлены зависимости пористости и прочности сцепления от технологических параметров напыления. Металлографические исследования напыленных образцов показали, что покрытия, полученные усовершенствованным металлизатором, являются более равномерными и имеют меньшую пористость. Микротвердость этих покрытий имеет более высокие значения. Увеличились прочность сцепления покрытия с основой на 30 % и коррозионная стойкость на 15 %. Уменьшилась пористость покрытия на 20–30 %. Коэффициент использования материалов увеличился с 0,6 до 0,85.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, сопло, покрытие, адгезия, газодинамический анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 952–957

DESIGN IMPROVEMENTS FOR SPRAYING DEVICE-GUN EM-17

A. E. Miheev*, S. S. Ivasev, A. V. Girn, M. N. Draganyuk, T. V. Trushkina

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

In this case study an improved design of the spray-gun electric arc metallizer has been analyzed.

To analyze the factors affecting the process of spraying a computer simulation with SolidWorks Flow Simulation to analyze gas-dynamic of spraying process of the electric arc metallizer EM-17 has been conducted.

After analysis of identified weaknesses for industrial electrometallization device (large spray angle, low speed and flow instabilities) several construction design changes were offered.

We proposed an upgrade design of spray device which is used as a nozzle with a cocurrent, compressing the main stream of the air stream. To confirm the theoretical research an experimental model of a spray device with improved design was made.

During the tests it has been found that the spray angle dropped from 45°–60° to 15°–20°, efflux was more stable and uniform. Comparative analysis of the performance of the deposition showed that when using the advanced-gun, it increased by an average of 25 %.

Comparative experimental study on deposition of different materials has been conducted.

Metallographic studies sprayed samples showed that the coatings provide improved metallizer are more uniform and have less porosity. The microhardness of the coating has a higher value.

Increased strength of adhesion of the coating to the substrate is 30 %, and corrosion resistance increased by 15 %. Decreased porosity of the coating is 20–30 %. The utilization of materials increased from 0.6 to 0.85.

Keywords: arc spraying nozzle, coating adhesion, gas-dynamic analysis.

Введение. Потери металла от износа и коррозии металлоконструкций составляют около 30 % от их массы. Для ремонта и восстановления изношенных деталей применяются методы газотермического напыления: осаждение из газовой фазы, наплавка, электродуговая металлизация (ЭДМ), а также газопламенное, детонационное и плазменное напыление [1–6]. Наиболее широкое применение при создании коррозионно-стойких покрытий получила электродуговая металлизация. Основным преимуществом метода является его высокая производительность, достигающая 50 кг/ч.

При дуговой металлизации образование потока напыляемых частиц происходит за счет плавления распыляемого материала электрической дугой. Для диспергирования расплавленного металла используют скоростной поток сжатого газа. Наибольшее распространение для напыления покрытий получила двухэлектродная схема. Распыляемый материал в виде двух проволок диаметром 1–5 мм подается в зону горения дуги механизмом подачи. Напряжение на проволоки подается от источника питания.

При соударении расплавленных частиц с поверхностью основы формируется покрытие. Соединение напыленного покрытия с основой осуществляется преимущественно за счет механического сцепления напыляемых частиц с выступами и впадинами на поверхности основы. Расплавленные частицы плотно ложатся друг на друга и, растекаясь, заполняют неровности шероховатой поверхности. Благодаря высокой температуре частиц в зоне контакта возникают участки схватывания (приваривания), и частицы прочно соединяются между собой и с основой с образованием сложной структуры покрытия.

Наряду с достоинствами имеются и недостатки метода: значительные размеры (более 100 мкм) напыляемых частиц и их невысокая скорость (50–100 м/с), большой угол распыла (40°–60°), низкий коэффициент использования металла (30–50 %), повышенное окисление металла и выгорание легирующих элементов. Все это сказывается на качестве наносимых покрытий (низкая прочность сцепления, значительная пористость и химическая неоднородность), что ограничивает область применения ЭДМ.

В настоящее время исследования по усовершенствованию процесса ЭДМ направлены на замену воздушного потока инертными газами [7–10], ведение процесса в камерах с общей защитой инертными газами [11–13], повышение давления в истекающей струе [13; 14], подогрев подложки [15–17]. Целью данной работы является усовершенствование конструкции сопла электродугового металлизатора ЭМ-17 и проведение экспериментальных исследований, подтверждающих ее эффективность.

Теоретическая часть. За основу работ по усовершенствованию распылительного устройства металлизатора была взята конструкция серийного металлизатора ЭМ-17, широко применяемая в промышленности в комплекте с источником КДМ-2. Для анализа факторов, влияющих на процесс распыления, была разработана и проанализирована 3D-модель металлизатора ЭМ-17 с использованием пакетов математического моделирования SolidWorks и Flow Simulation (рис. 1).

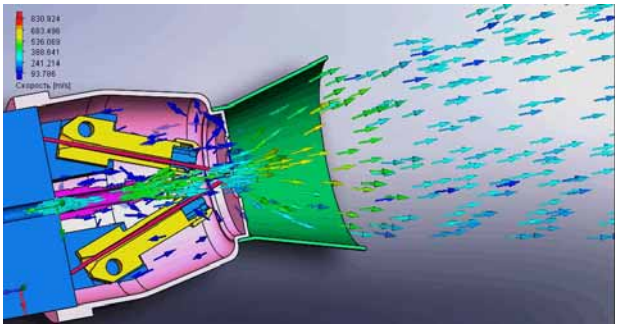


Рис. 1. Газодинамический анализ металлизатора ЭМ-17

Анализ моделирования показал, что металлизатор ЭМ-17 имеет большой угол распыла, низкую скорость выхода потока из сопла, нестабильность течения газового потока. Это связано с тем, что конструкция сопла способствует высокой турбулентности потока, что приводит к нестабильности истечения. Недостатком сопла также является то, что на образование турбулентных завихрений затрачивается значительная часть энергии струи, и ее распыляющая способность снижается.

На основе математического анализа и проведенных экспериментальных исследований различных вариантов конструкций сопел была разработана усовершенствованная конструкция распылительного устройства. С целью усиления газодинамического воздействия на периферийные области струи металла было предложено использовать кольцевое сопло со спутным, сжимающим основную струю потоком воздуха.

Использование дополнительной подачи сжимающего потока воздуха позволило повысить скоростные характеристики истечения, стабильность потока и уменьшить угол распыла.

Экспериментальная часть. Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен образец распылительного устройства усовершенствованной конструкции.

Процесс напыления с использованием данной конструкции представлен на рис. 2. Проведены сравнительные исследования по напылению различных материалов двумя металлизаторами. В качестве подложки использовались образцы из стали Ст3 и алюминия АМг6. В качестве напыляемого материала использовалась стальная (У8) и алюминиевая (АМг6) проволоки диаметрами 1,5–3 мм.

Напыление производилось при следующих режимах:

– напряжение дуги U = 25–45 В;
– сила тока I = 400 А;
– скорость подачи проволоки n = 1–4 м/мин;
– расстояние от среза сопла до образца l = 90–110 мм;
– давление подачи распыляющего газа P = 0,4–0,6 МПа;
– скорость перемещения металлизатора t = 1–5 см/с.

В ходе проведенных испытаний было установлено, что угол распыла снизился с 45°–60° до 15°–20°. Наряду с этим произошло увеличение скоростных показателей. Истечение становится более стабильным и равномерным. Концентрация распыляемых частиц находится по оси сопла. Анализ экспериментальных

исследований показывает, что введенные в конструкцию улучшения существенно сказываются на качестве наносимых покрытий.

Производительность напыления. В связи с тем, что на усовершенствованном металлизаторе был увеличен коэффициент использования материала и повышены скоростные характеристики распыляемого потока, значительно повысилась производительность. Результаты эксперимента по определению производительности представлены на рис. 3.

Результаты показывают, что при заданных силе тока (I) и напряжении (U) производительность при работе усовершенствованного металлизатора увеличилась в среднем на 25 %.

Металлография. Изучение микроструктуры обработанного образца проводили с помощью микроскопа Neophot 32. Увеличение микроскопа составляет от 10 до 2000 раз.

На рис. 4 представлена микроструктура покрытий, нанесенных алюминиевой проволокой (АМг6) на стальной образец (Ст3).

Нанесение покрытия осуществлялось при следующем режиме работы: U = 35 В; I = 400 А; n = 2 м/мин; l = 100 мм; P = 0,6 МПа; t = 5 с. На фотографиях микрошлифов можно наблюдать влияние технологического процесса на структуру напыленного покрытия. Видно, что покрытие, полученное с помощью усовершенствованного металлизатора, является более равномерным, что способствует хорошей прочности сцепления и низкой пористости.

Прочность сцепления. Для проведения испытаний на прочность сцепления покрытие наносилось на цилиндрические стальные грибки. Изменяемыми параметрами процесса нанесения покрытия были давление потока воздуха и расстояние до образца. Для определения прочности сцепления использовали разрывную машину Ibertest Eurotest T-50.

На рис. 5 представлены графики зависимости прочности сцепления алюминиевого покрытия на стальной подложке от расстояния до образца.

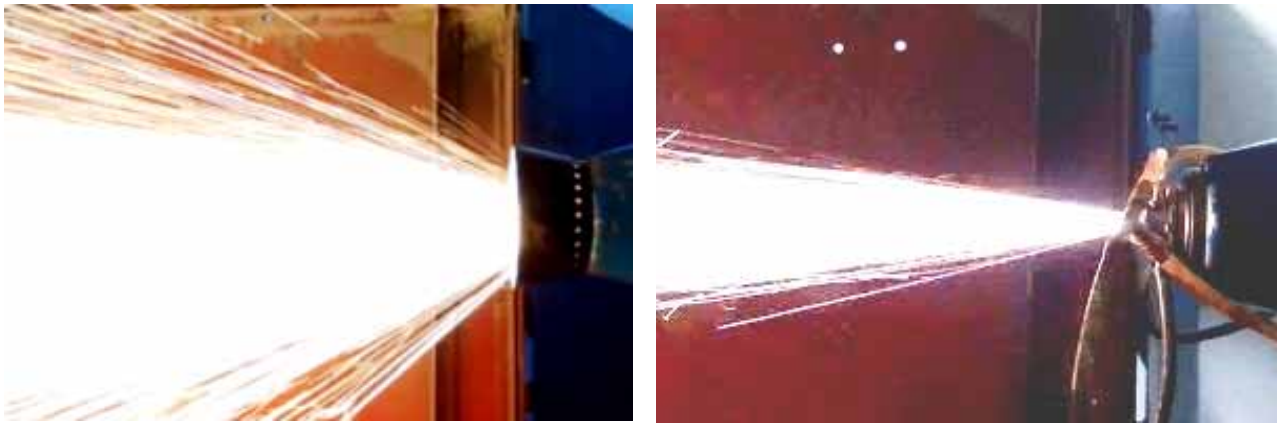


Рис. 2. Процесс напыления с использованием стандартного металлизатора ЭМ-17 (слева) и усовершенствованной конструкции (справа)

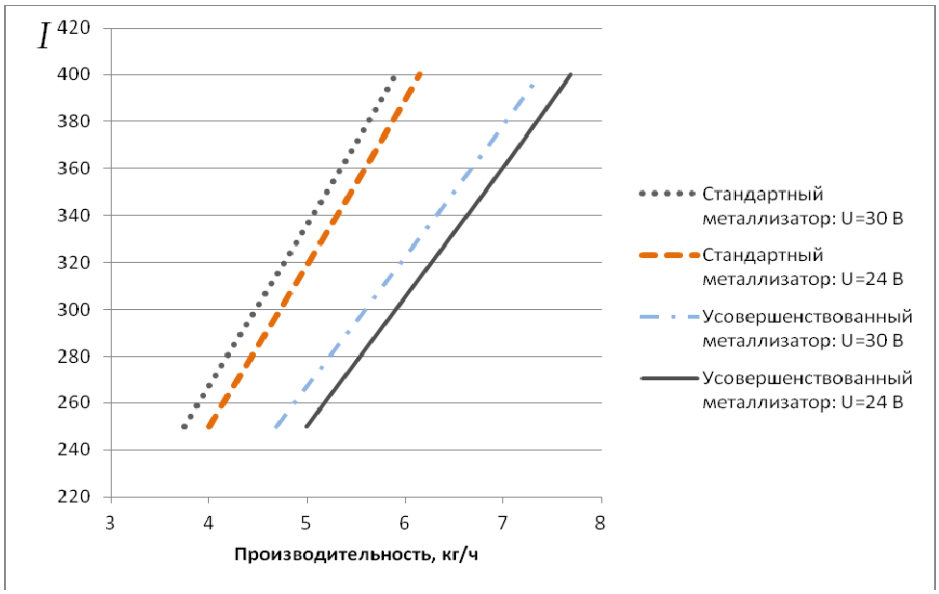
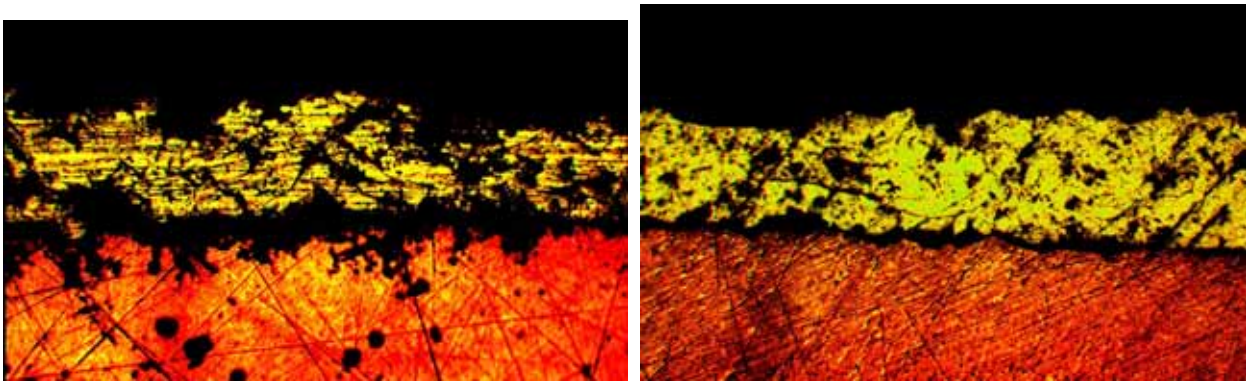


Рис. 3. Сравнительный анализ производительности стандартного и усовершенствованного металлизаторов



а *б*

Рис. 4. Микроструктура алюминиевого покрытия на стальном образце при увеличении в 400 раз:
а – стандартная конструкция; *б* – усовершенствованная конструкция

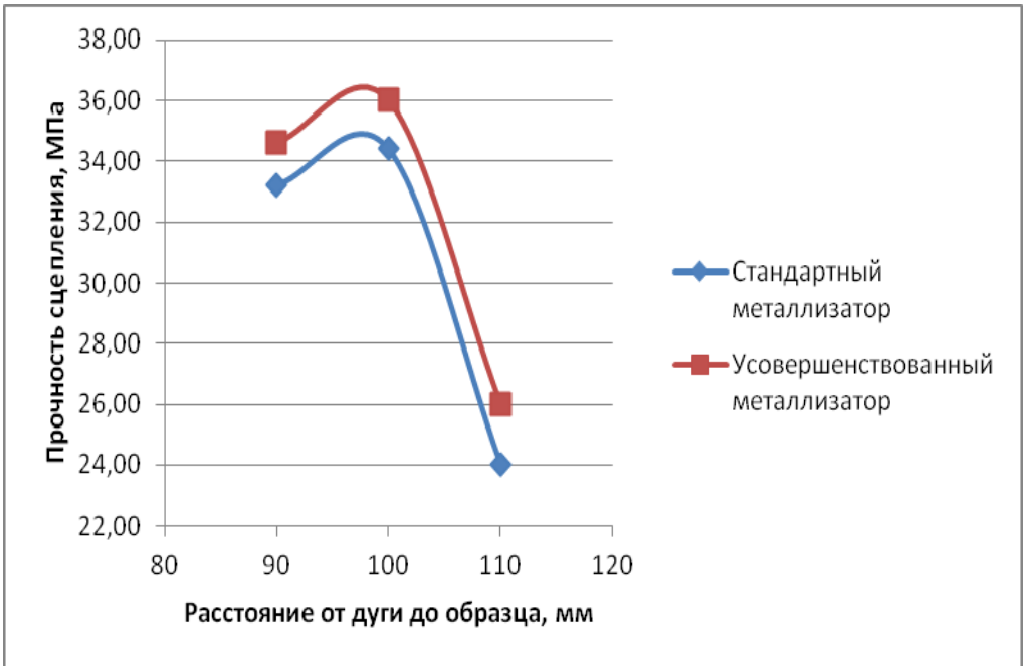


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления от расстояния до образца

Определено оптимальное расстояние от дуги до образца, равное 100 мм. При данном расстоянии наблюдается самая высокая прочность сцепления.

Также были проведены исследования по влиянию скорости потока на прочность сцепления покрытия с основой. Скорость потока регулировалась изменением давления подачи основного потока сжатого воздуха. При увеличении скорости расплавленных частиц достигается более высокая прочность сцепления. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

При подаче сжатого воздуха одинакового давления в оба устройства на усовершенствованном металлизаторе наблюдается увеличение скорости потока, что приводит к повышению прочности сцепления покрытия с подложкой.

Микротвердость. На приборе ПМТ-3 были проведены измерения микротвердости покрытия. На стальной образец (Ст3) было нанесено покрытие из стали (У8), а на алюминиевый образец (АМг6) была нанесено покрытие из того же материала (АМг6). Результаты измерений микротвердости представлены на рис. 6.

При напылении алюминиевого покрытия его твердость получается меньше, чем у основы. Это связано с тем, что покрытие получается пористым. В связи с тем, что твердость стали У8 выше, чем у стали Ст3, напыленное покрытие превосходит по твердости основу, даже несмотря на его пористость. Установлено, что покрытия, полученные с помощью усовершенствованного металлизатора, имеют более высокие значения микротвердости.

Коррозионная стойкость. Исследования на коррозионную стойкость напыляемых покрытий проводились в растворе воды с содержанием NaCl 3 %, H_2O_2 0,1 %. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2.

Видно, что на усовершенствованном металлизаторе покрытия получаются более коррозионно-стойкие, чем на стандартном.

Таблица 1

Результаты исследования на прочность сцепления

Давление подачи основного потока, МПа	Стандартный металлизатор		Усовершенствованный металлизатор	
	Скорость потока, м/с	Прочность сцепления, МПа	Скорость потока, м/с	Прочность сцепления, МПа
0,4	350	28	602	30
0,5	535	29,5	705	31,5
0,6	670	34,5	830	36

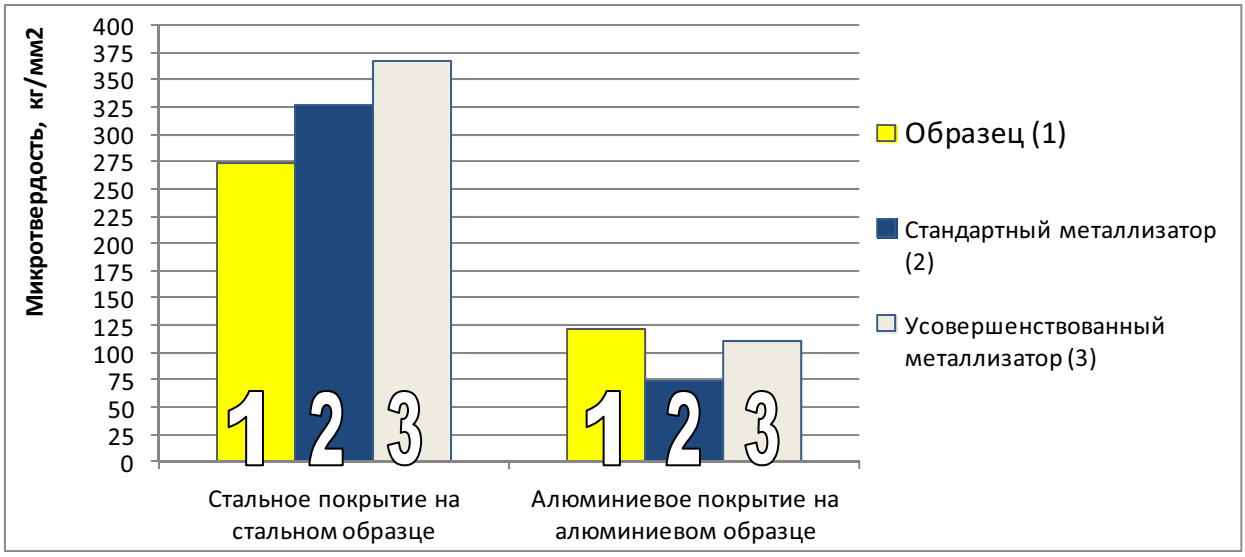


Рис. 6. Результаты измерения микротвердости покрытий

Таблица 2

Результаты исследований на коррозионную стойкость

Параметр	Стандартный металлизатор	Усовершенствованный металлизатор
Потеря массы	0,25 %	0,11 %
Корродируемая поверхность	57 %	27 %
Потеря толщины	27 %	16 %

Заключение. В работе был проанализирован стандартный металлизатор ЭМ-17 и выявлены его недостатки, такие как большой угол распыла и низкая скорость распыляемых частиц. Для улучшения процесса электродуговой металлизации и получения более качественных покрытий разработана усовершенствованная конструкция металлизатора. На этой конструкции были проведены экспериментальные исследования влияния технологических параметров на качество покрытий. Установлено, что при напылении усовершенствованным металлизатором получаются более качественные покрытия. Увеличились прочность сцепления покрытия с основой на 30 % и коррозионная стойкость на 15 %. Уменьшилась пористость покрытия на 20–30 %. Коэффициент использования материалов увеличился с 0,6 до 0,85.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации, государственный контракт № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/к.

Acknowledgments. This work was financially supported by the Ministry of Education of the Russian Federation, the state contract № 2.G2531.0043, 2014/211, 9.447.2014/k.

Библиографические ссылки

1. Хасуй А., Моригаки О. Наплавка и напыление : учебник для вузов. М. : Машиностроение, 1985. С. 136–147.
2. Газотермическое напыление : учеб. пособие / Л. Х. Балдаев [и др.]. М. : Маркет ДС, 2007. 105 с.
3. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Киев : Наукова думка, 1987. 120 с.
4. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование : учебник для вузов. М. : Металлургия, 1992. С. 61–64.
5. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М. : Машиностроение, 1981. 212 с.

6. Сидоров А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М. : Машиностроение, 1987. С. 53–55.

7. Синани И. Л., Федосеева Е. М., Береснев Г. А. Методы нанесения покрытий : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. С. 60–71.

8. Тушинский Л. И., Плохов А. В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск : Наука, 1986. 105 с.

9. Кофанова Н. К. Коррозия и защита металлов : учеб. пособие для студентов техн. спец. Алчевск, 2003. 181 с.

10. Зенин Б. С., Слосман А. И. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. Томский политехн. ун-т. 2-е изд. Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. 120 с.

11. Рогов В. А., Ушомирская Л. А., Чудаков А. Д. Основы высоких технологий : учеб. пособие. М. : Вузовская книга, 2001. 256 с.

12. Пат. 2047395 Российская Федерация, МПК[6] B 05 B 7/22, B 05 B 7/18. Распылительная головка электродугового металлизатора / Коробов Ю. С., Бороненков В. Н., Барановский В. Э. Заявл. 29.07.92 ; опубл. 10.11.95.

13. Пат. 2191637 Российская Федерация, МПК[7] B 05 B 7/22, B 05 B 5/06. Распылительная головка электродугового металлизатора / Окладников С. И., Салохин А. В. Заявл. 14.12.2000 ; опубл. 27.10.2002.

14. Пат. 2385452 Российская Федерация, МПК G 01 L 9/02. Прибор для измерения давления гетерофазного потока / Соловьев Р. Ю., Литовченко И. Н., Петряков Б. И., Воробьев П. А., Юсим М. Ю. Заявл. 18.09.2007 ; опубл. 27.03.2009.

15. Пат. 2386720 Российская Федерация, МПК C 23 C 4/12. Способ электродуговой металлизации / Гусев В. М., Гусев М. В., Исакаев М. Х., Мордынский В. Б., Маричев А. В. Заявл. 12.08.2008 ; опубл. 20.04.2010.

16. Пат. 2191075 Российская Федерация, МПК[7] B 05 B 7/22. Электродуговой металлизатор / Окладников С. И., Салохин А. В. Заявл. 27.03.2001 ; опубл. 20.10.2002.

17. Пат. 2094523 Российская Федерация, МПК[6] C 23 C 4/12, B 05 B 7/22. Устройство электродугового высокоскоростного проволочного напыления / Березовский Ф. М., Кондратов С. И. Заявл. 24.01.95 ; опубл. 27.10.97.

References

1. Khasuy A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, P. 136–147.

2. Baldaev L. Kh. *Gazotermicheskoe napylenie* [Gas thermal spraying]. Moscow, Market DS Publ., 2007, 105 p.

3. Borisov Yu. S., Kharlamov Yu. A., Sidorenko S. L. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov* [Thermal coatings from powder materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 120 p.

4. Kudinov V. V., Bobrov G. V. *Nanesenie pokrytiy napyleniem. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie* [The spray coating. The theory, technology and equipment]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1992, P. 61–64.

5. Kudinov V. V., Ivanov V. M. *Nanesenie plazmoy tugoplavkikh pokrytiy* [Application of plasma refractory coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 212 p.

6. Sidorov A. I. *Vosstanovlenie detaley mashin napyleniem i naplavkoy* [Restoring spraying of machine parts and surfacing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, P. 53–55.

7. Sinani I. L., Fedoseeva E. M., Beresnev G. A. *Metody naneseniya pokrytiy* [Coating method]. Perm', Izd-vo Perm. gos. tekhn. un-ta Publ., 2008, P. 60–71.

8. Tushinskiy L. I., Plokhov A. V. *Issledovanie struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv pokrytiy* [Investigation of the structure and physicomechanical properties of the coatings]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 105 p.

9. Kofanova N. K. *Korroziya i zashchita metallov* [Corrosion and protection of metals]. Alchevsk, 2003, 181 p.

10. Zenin B. S., Slosman A. I. *Sovremennye tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya i naneseniya pokrytiy* [Modern technologies of surface hardening and coating]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2012, 120 p.

11. Rogov V. A., Ushomirskaya L. A., Chudakov A. D. *Osnovy vysokikh tekhnologiy* [High-tech]: ucheb.posobie, Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2001, 256 p.

12. Korobov Yu. S., Boronenkov V. N., Baranovskiy V. E. *Raspylitel'naya golovka elektrodugovogo metallizatora* [The spray head of the arc-gun]. Patent RF, no. 2047395, 1995.

13. Okladnikov S. I., Salokhin A. V. *Raspylitel'naya golovka elektrodugovogo metallizatora* [Arc-gun spray head]. Patent RF, no. 2191637, 2002.

14. Solov'ev R. Yu., Litovchenko I. N. , Petryakov B. I., Vorob'ev P. A., Yusim M. Yu. *Pribor dlya izmereniya davleniya geterofaznogo potoka* [Instruments for measuring pressure heterophasic stream]. Patent RF, no. 2385452, 2010.

15. Gusev V. M., Gusev M. V., Isakaev M. K., Mordynskiy V. B., Marichev A. V *Sposob elektrodugovoy metallizatsii* [Arc spraying method]. Patent RF, no. 2386720, 2010.

16. Okladnikov S. I., Salokhin A. V. *Elektrodugovoy metallizator* [Arc metallizer]. Patent RF, no. 2191075, 2002.

17. Berezovskiy F. M., Kondratov S. I. *Ustroystvo elektrodugovogo vysokoskorostnogo provolochnogo napyleniya* [The device of a high-speed wire arc spraying]. Patent RF, no. 2094523, 1997.

© Михеев А. Е., Ивасев С. С., Гирн А. В., Драганюк М. Н., Трушкина Т. В., 2015

УДК 504.75

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 958–968

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА ПРЕДПРИЯТИЯМИ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

Е. Н. Потылицына, О. В. Тасейко*, Е. В. Сугак

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

В процессе производства, эксплуатации и обслуживания объектов машиностроения и ракетно-космических систем возможны выбросы опасных загрязняющих веществ в окружающую среду. Рассматривается решение задачи совершенствования научно-методических основ управления канцерогенной опасностью для здоровья населения от загрязнения атмосферного воздуха, обусловленного выбросами стационарных и нестационарных источников, на примере крупного промышленного города – Красноярска. Для решения поставленной задачи проведен анализ смертности от рака различной локализации и статистических данных загрязнения окружающей среды канцерогенными веществами с 2000 по 2012 гг. Выявлены загрязняющие канцерогенные вещества, находящиеся в воздухе, дающие наибольший вклад в смертность от новообразований различной локализации. Проанализированы основные источники выбросов канцерогенных веществ в воздух г. Красноярска и их вклад в общую смертность. Описаны особенности возникновения и протекания онкологических заболеваний, а также проанализированы методы исследования латентного периода раковых опухолей. Методами корреляционного анализа были определены наиболее чувствительные к воздействию канцерогенных загрязнителей атмосферного воздуха органы и системы человека. Результаты расчетов показали, что наибольшее число органов-мишеней связано с влиянием бенз(а)пирена. Выполнена оценка временной отсрочки (лага) онкологических заболеваний различной локализации с помощью кросскорреляционных функций входных факторов с выходными показателями, что значительно облегчает процесс выявления величины запаздывания по сравнению с другими методами. Полученные результаты подкреплены описанием подобных исследований в других промышленных городах (г. Кемерово) и регионах (Белгородская область) России. Предложенный подход позволяет проводить оперативную оценку опасности воздействия канцерогенных веществ на здоровье сотрудников предприятий и населения прилегающих территорий.

Ключевые слова: канцероген, онкологические заболевания, предраковые заболевания, латентный период, смертность, корреляционный анализ.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 958–968

ASSESSMENT OF INFLUENCE OF AIR POLLUTION PRODUCED BY ENGINEERING ENTERPRISES ON HUMAN HEALTH

E. N. Potylitsyna, O. V. Taseiko*, E. V. Sugak

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: taseiko@gmail.com

Production, operation and service of mechanical and aerospace engineering systems can be the source of dangerous pollutants. This work investigates the improvement of scientific and methodical bases to manage the cancerigenic danger to population health from air pollution caused by stationary and non-stationary emission sources. The analyses of epidemiological data showed that cancer mortality has grown by 30 % concerning total mortality in Krasnoyarsk from 2000 to 2012. The analysis of air pollution showed that concentrations of some cancerigenic substances increased significantly during 12 years according to the data of state network of monitoring posts. The pollutants that give the greatest contribution to mortality of various cancers were revealed. This pollutant emission sources are analysed. It is difficult to blame a single source as being responsible for the high levels of air pollution with cancerigenic effect on human health in Krasnoyarsk city. The cancer latency period has been estimated by statistical methods. The correlation analysis applied to determine the most sensitive organs and systems of the person influenced by cancerigenic pollutants. Benzopyrene has influence on the greatest number of target organs and systems: digestive system (stomach, liver, pharynx), immune system (limphoma), brain and nervous system. The assessment of a time lag for cancer of various organs and systems is executed with using the cross correlation functions. The longest effect with time lag 12 years is observed

for digestive and respiratory cancer. The offered approach allows us to carry out an operative assessment of impact of carcinogenic effect on health of the plant's staff and inhabitants of the surrounding.

Keywords: carcinogens, cancer, precursor of cancer, latent period, mortality, correlation analysis.

1. Введение

В процессе производства, эксплуатации и обслуживания объектов машиностроения и ракетно-космических систем возможны выбросы опасных загрязняющих веществ в окружающую среду, способствующих возникновению и повышению экологических рисков для населения промышленных регионов [1; 2]. При этом наибольшую опасность представляют канцерогенные вещества, вызывающие злокачественные новообразования [3].

В последние десятилетия отмечается существенный рост и «омоложение» онкологических заболеваний. Существенными причинами роста злокачественных новообразований являются, с одной стороны, ухудшение социально-экономических условий, снижение жизненного уровня населения, курение, алкоголизм и загрязнение окружающей среды, с другой стороны, недостаточный уровень профилактических мероприятий в сфере онкологии, недостатки в организации и качестве медицинской помощи больным. До 80 % случаев рака связано с воздействием вредных факторов окружающей среды и неправильным образом жизни [4; 5].

В целом рак считается болезнью лиц в основном старшего возраста, когда накоплена достаточная экспозиционная доза, имеются предраковые заболевания, ослаблен иммунитет и др. Однако если онкогенная нагрузка на организм растет, латентный период сокращается, и люди заболевают раком в более раннем возрасте [6].

Элементы оценки экологического риска включены в систему методов анализа экологической и санитарно-эпидемиологической ситуации, в структуру социально-гигиенического мониторинга [1; 7; 8].

Работа посвящена анализу комплексного воздействия факторов загрязнения атмосферы на смертность от онкологических заболеваний населения г. Красноярска. Выявлены загрязняющие вещества, оказывающие наибольшее влияние на смертность от различных видов новообразований. Методами корреляционного анализа определены органы и системы человека, наиболее чувствительные к воздействию канцерогенных загрязнителей атмосферного воздуха. Выполнена оценка временного запаздывания влияния канцерогенов на онкологические заболевания различной локализации.

2. Цель и задачи

Цель работы – оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха на смертность жителей г. Красноярска от онкологических заболеваний.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ динамики содержания канцерогенных веществ в воздухе г. Красноярска.

2. Анализ структуры смертности от онкологических заболеваний различной локализации и выявление зависимости отдельных видов рака от канцерогенов в атмосферном воздухе.

3. Оценка отсрочки влияния загрязняющих атмосферу веществ на показатели смертности от онкологических заболеваний.

В работе использовались данные среднегодовых концентраций полютантов, характеризующих канцерогенную опасность загрязнения атмосферного воздуха г. Красноярска, по данным государственной наблюдательной сети, предоставленным Красноярским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями Среднесибирского УГМС, за период наблюдений с 2000 по 2012 гг. [9]. Показатели смертности от онкологических заболеваний за тот же период предоставлены территориальным органом федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю (Красноярскстат).

3. Особенности возникновения и протекания онкологических заболеваний

Периоды развития опухолевого роста. Развитие злокачественных новообразований от нормального состояния клетки до заболевания проходит ряд последовательных стадий, которые составляют достаточно продолжительный временной интервал. На каждой из этих стадий патологический процесс характеризуется соответствующими морфологическими изменениями, что находит отражение в клинической картине заболевания [10].

Темпы удвоения различных видов опухоли зависят от индивидуальных особенностей опухоли и организма, в том числе от локализации, кровоснабжения, возраста, степени морфологической дифференцировки опухолевых клеток и др. [11].

С клинических позиций процесс развития новообразования можно разделить на три периода: 1) предбластоматозное состояние (предопухолевое заболевание); 2) доклиническое состояние – орган поражен опухолевым процессом, а клинических признаков этого поражения нет; 3) клиническая стадия, на которой появляются признаки нарушения функции органа, появляются симптомы болезни. В подавляющем большинстве случаев больные со злокачественными образованиями обращаются к врачу в третьем периоде болезни, что позволяет выполнить им радикальные операции лишь в 10–50 % случаев [12].

Под воздействием ряда факторов развивается распространенное изменение тканей, проявляющееся ускоренным разрастанием клеточных элементов. К ним относят генетическую конституцию человека, его гормональный баланс, неправильно организованное питание, присутствие в окружающей среде специфических и неспецифических вредных факторов, изменяющих внутреннюю среду организма [13].

Предраковые заболевания (рост клеток невоспалительного характера, предшествующий раку) характеризуются длительным течением. Большинство предопухолевых заболеваний представляют собой лишь благоприятный фон для возникновения злокачественной опухоли, но это возникновение необязательно.

Есть и такие предопухолевые процессы, которые обязательно ведут в конечном счете к злокачественному росту. Этих заболеваний немного. К заболеваниям с повышенной возможностью возникновения злокачественного роста и требующих специальных методов определения начала опухолевого роста относятся язва желудка, очаговый гастрит, семейный полипоз толстого кишечника, хронический бронхит, часто повторяющаяся пневмония, бронхоэктатическая болезнь, эрозия шейки матки, мастопатия.

Доклинический период развития злокачественной опухоли охватывает промежуток от момента возникновения первых клеток злокачественной опухоли до появления первых клинических признаков заболевания. Продолжительность этого периода вариабельна, зависит от биологических свойств опухоли, состояния организма заболевшего, иногда длительность его измеряется годами. Только опухоли, достигшие размеров 0,5–1,0 см распознаются клинически во время оперативного вмешательства, эндоскопического, рентгенологического исследования. Опухоли существуют в течение 2–3 лет, прежде чем могут быть выявлены клиническими методами.

У большинства больных диагноз устанавливается в клиническом периоде злокачественных опухолей, когда проявляются многочисленные и разнообразные симптомы.

На основании результатов исследований генов опухолей, меченых радиоактивными маркерами, и эпидемиологических данных был сделан вывод, что между воздействием агента и развитием опухоли имеется длительный латентный период, достоверное определение которого является достаточно сложной задачей [14].

Общие закономерности действия химических канцерогенных веществ. До 80–90 % всех форм рака у человека – результат действия факторов окружающей среды – химических веществ, вирусов, физических агентов и т. д. Во многих случаях развитие опухоли может быть связано с воздействием канцерогенов, среди которых наиболее активными считаются полициклические ароматические углеводороды, ароматические амины и амиды, нитросоединения, офлатоксины [15]. В настоящее время известно более 1500 химических соединений, обладающих канцерогенным эффектом. При этом пути попадания этих веществ в организм человека могут быть различными.

Кроме того, существуют специфические факторы, с определенной вероятностью увеличивающие риск появления опухолей конкретного органа или системы. К их числу относят, в первую очередь, курение (до 30 % влияния) и питание (35 %). Влиянию таких факторов, как воздействие профессиональных вредностей, наследственная предрасположенность, эндокринные нарушения, отводят в совокупности около 17 %. На химические канцерогены приходится около 18 % [16].

Все химические канцерогенные соединения обладают рядом общих черт действия независимо от их структуры и физико-химических свойств. Прежде всего, для канцерогенов характерен длительный латентный период действия: истинный, или биологический, и клинический латентные периоды. Опухолевая трансформация начинается не сразу после контакта канцерогена с клеткой: вначале канцерогенное вещество подвергается биотрансформации, в результате образуются канцерогенные метаболиты, которые внедряются в клетку, изменяют ее генетический аппарат, обусловливая малигнизацию.

Для многих канцерогенов характерна химическая инертность, при этом почти все являются только проканцерогенами. Чтобы стать истинными канцерогенами, они должны подвергнуться в организме так называемой активации, в результате которой могут возникнуть метаболиты с бластомогенной активностью [17].

Канцерогенный эффект определяется соотношением дозы и времени экспозиции вещества. Для веществ средней канцерогенной активности период между началом действия канцерогенного агента и возникновением злокачественной опухоли составляет около 13–18 лет. Чем выше активность канцерогена, тем короче латентный период [18; 19].

В целом длительность латентного периода может составлять от 10 до 50 % продолжительности жизни человека и животных [20].

Так, возникновение острого лейкоза без предшествующих изменений периферической крови связывают с длительным (более 5–10 лет) контактом с бензолом, даже спустя несколько лет после прекращения контакта с ним. С возникновением рака полости носа и придаточных пазух связывают влияние продуктов, выделяющихся при рафинировании никеля, а также при обработке дерева в деревообделочном и особенно мебельном производствах. Действие этих веществ проявляется в разные сроки, иногда спустя 20–25 лет [21].

Для г. Кемерово были получены значения времени запаздывания возникновения заболеваний от загрязнения воздуха для следующих видов рака: рак легкого – от 6 до 9 лет у женщин и от 8 до 14 лет у мужчин, рак желудка – от 9 до 16 лет у женщин и от 8 до 14 лет у мужчин, рак щитовидной железы – от 9 до 16 лет у женщин и от 10 до 15 лет у мужчин. Разброс в значениях лага вызван влиянием разных источников выбросов канцерогенных веществ [22].

По результатам корреляционного анализа показателей злокачественных новообразований кожи и общего содержания озона в Республике Бурятия максимальный лаг составил 10 лет [23].

Для Белгородской области периоды отсроченного воздействия некоторых антропогенных загрязнителей воздуха и почвы на заболеваемость злокачественными новообразованиями составили: для свинца – 3 года, для железа и марганца – 2 года, для окислов азота и углеводородов – 3 года, для минеральных удобрений – 1–2 года [24]. Эти значения явно свидетельствуют о сокращении латентных периодов развития раков.

Эпидемиологические методы исследования латентного периода раковых опухолей. Исследованиями латентного периода раковых заболеваний занимается онкоэпидемиология. В зависимости от подходов к изучению и методов выделяют два направления: описательная и аналитическая онкоэпидемиология [18].

Описательная эпидемиология изучает особенности распространения отдельных форм злокачественных опухолей в конкретных группах населения. Предмет изучения описательной эпидемиологии – заболеваемость и смертность в разных географических регионах и населенных пунктах среди различных групп населения, а также связь (ассоциация) между различными характеристиками региона и показателями частоты злокачественных опухолей. Описательная эпидемиология оперирует категориями, основу которых составляет территориальный учет онкологических заболеваний [25]. Производится расчет и анализ показателей смертности, заболеваемости и болезненности как в целом для всего населения и для всех злокачественных новообразований, так и для заболевших и умерших с учетом локализации и разновидности опухоли, клинической группы и стадии процесса. Изучаются также показатели частоты впервые выявленных заболеваний, эффективности диспансеризации соответствующих контингентов, качества диагностики и специальной терапии и оценка отдаленных результатов лечения.

В связи с обнаружением повышенной заболеваемости раком на ряде производств, занятых на переработке ряда минералов (никель, хром, беррилий, кадмий, кобальт, мышьяк и др.), обнаруживших в эксперименте канцерогенные свойства, широкое развитие получило исследование так называемого профессионального рака. Первое описание профессионального рака было сделано еще в 1775 году английским врачом Поттом при обнаружении случаев рака кожи у трубочистов. Через 120 лет (в 1895 году) был описан рак мочевого пузыря у рабочих анилинокрасочной промышленности, в начале XX века – рак легких у горнорабочих [26].

Важным этапом исследования профессионального рака является количественная оценка уровня и длительности воздействия канцерогенного агента на изучаемый контингент на основе среднегодовых концентраций канцерогенов в воздухе рабочей зоны, а также пути их поступления в организм. На основании этих исследований делаются выводы о длительности латентного периода возникновения раковой опухоли [26–28].

Одна из ключевых проблем аналитической эпидемиологии заключается в том, чтобы научиться выявлять потенциальные канцерогенные агенты, определять степень их риска для людей, определять время латентного периода, а также осуществлять поиск тех факторов, которые препятствуют канцерогенезу или усиливают его.

Оценка и прогнозирование потенциального риска для здоровья человека является одной их важнейших социально-экологических проблем и связана с необходимостью изучения причинно-следственных связей показателей здоровья населения и демографической динамики с уровнем антропогенной нагрузки на окружающую среду [29]. Оценка социально-экологических рисков может быть использована для проведения целенаправленной экологической политики и политики в области охраны здоровья населения, выделения приоритетных территорий и групп населения повышенного риска, нуждающихся в первоочередных природоохранных и лечебно-профилактических мероприятиях. Концепция оценки риска рассматривается в качестве главного механизма разработки и принятия управленческих решений как на международном, государственном и региональном уровнях, так и на уровне отдельного предприятия [30; 31].

Определение величины запаздывания производится по кросскорреляционным функциям входных факторов (уровни концентраций вредных канцерогенных веществ в атмосферном воздухе) с выходными показателями (показатели смертности взрослого населения от раковых заболеваний различной локализации). Кросскорреляционная функция может служить средством исследования динамики физиологических процессов и их взаимных регуляций [28; 32; 33].

В связи со сложностью структуры канцерогенной ситуации применяют различные многофакторные модели, которые строятся как по пространственной информации, так и по рядам динамики [3; 8; 34–37]. Последнее время для этих целей активно используются технологии искусственного интеллекта и искусственные нейронные сети [38–42].

Основная идея многофакторного прогнозирования заключается в выявлении тенденций зависимости изучаемого явления (заболеваемости раком) от определяющих его факторов на основе тенденций развития самих факторов. Статистическая оценка зависимости изменений изучаемого явления от тенденций развития во времени факторных признаков осуществляется с помощью коэффициентов уравнения множественной регрессии. При исследовании многофакторных моделей учесть все взаимосвязанные факторы не представляется возможным, поэтому производится отбор наиболее характерных факторов с помощью оценки силы влияния и частных коэффициентов детерминации [43].

Неравномерность темпов развития отдельных компонентов системы создает трудности для сопоставления во времени и оценки результатов совместного воздействия комплекса факторов окружающей среды на изменение заболеваемости. Значение времени запаздывания оценивается так же, как и в однофакторных моделях, с помощью коэффициентов кросскорреляции.

4. Результаты и обсуждение

Анализ загрязнения воздуха канцерогенами. В воздухе г. Красноярска встречается большое количество различных канцерогенных загрязнителей, но на постах наблюдения анализируется далеко не полный их перечень [9; 44]. Среднесибирским УГМС в воздухе г. Красноярска выполняются измерения шести веществ: кадмий, свинец, бензол, этилбензол,

формальдегид, бенз(а)пирен. Однако концентрация кадмия на протяжении продолжительного числа лет равна нулю.

Отнесение полютантов к группе канцерогенов или неканцерогенов неоднозначно по данным различных зарубежных и отечественных организаций, занимающихся изучением рака. Так, согласно российским нормативным документам этилбензол не является канцерогеном [25]. Не относит его к группе канцерогенных веществ и EPA (Environmental protection agency, США) [45]. Но по данным Международного агентства исследования рака (МАИР) этилбензол вызывает злокачественные новообразования различных мест локализации у крыс и мышей, возможен канцерогенный эффект и для человека (группа 2B) [46]. Поэтому в данной работе этилбензол был отнесен в группу канцерогенов.

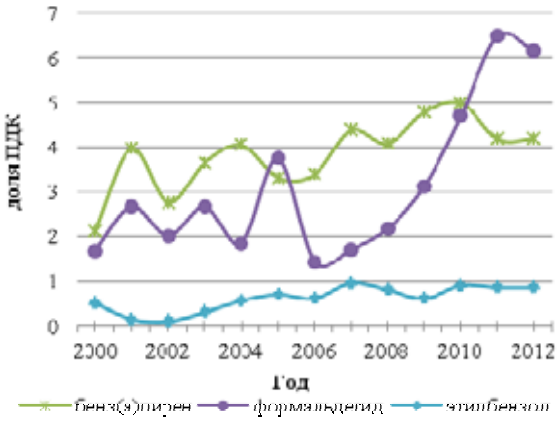
Анализ годовой динамики канцерогенных веществ по данным Среднесибирского УГМС показал, что с 2000 по 2012 гг. наблюдался рост содержания в воздухе г. Красноярска этилбензола (в 1,7 раза), формальдегида (в 3,7 раза) и бенз(а)пирена (в 2 раза) (см. рисунок). Содержание этих веществ превышало гигиенические нормативы в течение всего периода. Концентрации бензола и никеля значительно не менялись и установленные ПДК не превышали.

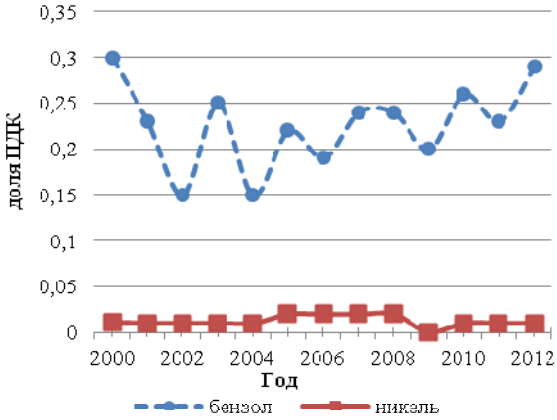
По данным томов ПДВ для г. Красноярска за 2012 г. были выявлены основные источники промышленных выбросов анализируемых канцерогенов (табл. 1).

Следует отметить, что общий источник выбросов – предприятия обрабатывающей отрасли – есть только у формальдегида и этилбензола, и отвечает он всего лишь за треть всех выбросов этих веществ. Остальные вещества имеют свои доминирующие источники выбросов в атмосферный воздух г. Красноярска. Это подтверждает необходимость учета каждого из этих веществ в решаемой задаче.

Показатели смертности от злокачественных новообразований у жителей г. Красноярска. Согласно ежегодникам Красноярскстата [5], в период с 2000 по 2012 гг. в г. Красноярске умерло от всех причин смерти около 150 тыс. человек. Из них от новообразований – около 25 тыс. человек, что составляет 16,7 % от всех умерших за 12 лет (табл. 2).

Анализ данных показывает, что в целом смертность от онкологических заболеваний с 2000 по 2012 гг. выросла на 30 % относительно показателя общей смертности. Распределение по отдельным видам причин смертности существенно не изменилось, основная доля приходится на злокачественные новообразования желудочно-кишечного тракта и органов дыхания и составляет примерно по 20 % на каждую группу. Доля умерших от болезней репродуктивной системы изменилась за рассматриваемый период незначительно. Вклад лейкемии в эту структуру также не претерпел изменений и составил около 3 %. Около 45 % составили болезни, по которым нет достаточных оснований для отнесения их к группе эколого-зависимых.





Содержание канцерогенных веществ в воздухе г. Красноярска

Таблица 1

Основные источники выбросов канцерогенных веществ в г. Красноярске [47]

	Бензол	Этилбензол	Формальдегид	Бенз(а)пирен	Никель
АЗС	45 %	3 %	–	–	–
Обрабатывающие производства	–	28 %	24 %	–	3,5 %
Алюминиевая промышленность	–	–	–	97 %	–
Автотранспорт	–	–	65 %	0,5 %	–
Машиностроение	–	–	–	–	94 %
Захоронение ТБО	–	61 %	–	–	–
Остальные предприятия	55 %	8 %	11 %	1,5 %	2,5 %
Всего, т/г	7,2	5,2	81,1	1,9	0,004

Анализ влияния загрязняющих веществ на причины смертности. Для оценки влияния загрязняющих веществ на показатели смертности от рака рассчитывались коэффициенты корреляции между среднегодовыми концентрациями канцерогенных веществ и численностью умерших по каждой группе заболеваний.

Проверка значимости коэффициента корреляции оценивалась по критерию Стьюдента с уровнем доверительной вероятности 0,95 [12].

По результатам расчетов значимых корреляционных связей между загрязнением атмосферного воздуха бензолом и показателями смертности от онкологических заболеваний не выявлено, хотя анализ литературных данных подтверждает влияния бензола на течение таких заболеваний, как лимфоретикулярная саркома, лейкоз, лейкемия, лимфомы и болезни кровеносной системы [49; 50; 52].

Несмотря на то, что нет однозначного подтверждения канцерогенности этилбензола для организма человека, была обнаружена статистически значимая связь между его содержанием в воздухе и раком целого ряда органов-мишеней (ротовая полость, печень, яичники).

Для дальнейшего анализа были выбраны только те виды рака, связь которых с рассматриваемыми загрязнителями подтверждена данными различных литературных источников, в том числе руководством по оценке риска (табл. 3) [53].

Анализ лага. Оценка величины запаздывания выполнялась по кросскорреляционным функциям, определяемым между концентрациями канцерогенов в атмосферном воздухе и показателями смертности взрослого населения от раковых заболеваний различной локализации.

Результаты расчетов показали, что наибольшее число органов-мишеней связано с влиянием бенз(а)-пирена. Длительный эффект с задержкой до 12 лет наблюдается для органов желудочно-кишечного тракта и органов дыхания (табл. 4). Обнаруженную сильную связь за короткие периоды времени следует, вероятно, относить не столько к возникновению и развитию заболеваний, сколько к снижению канцероустойчивости на фоне уже имеющихся онкологических заболеваний. Короткий временной лаг скорее свидетельствует о влиянии на общее состояние иммунной системы, что может приводить к ускорению течения болезни.

Таблица 2

Смертность от онкологических заболеваний среди жителей г. Красноярска

Год	Доля умерших от новообразований, % от общей смертности	Доля умерших по группам, % от всех умерших от злокачественных новообразований			
		Желудочно-кишечный тракт	Органы дыхания	Репродуктивная система	Лейкемия
2000	14,5	20,6	23,0	12,1	2,3
2001	15,0	24,4	21,9	12,7	2,9
2002	13,9	21,0	23,9	12,0	2,5
2003	14,3	22,9	21,4	13,4	2,4
2004	16,4	21,3	19,7	13,1	2,9
2005	15,4	21,2	19,1	14,3	3,9
2006	17,4	19,9	20,3	15,2	3,4
2007	18,0	20,4	20,5	13,4	2,7
2008	18,5	20,7	20,1	14,0	2,5
2009	18,8	21,0	19,3	14,2	3,0
2010	18,5	21,5	20,4	14,0	2,7
2011	18,6	20,0	17,4	14,0	2,9
2012	18,9	19,7	19,6	13,8	3,2

Таблица 3

Перечень канцерогенов и соответствующие им органы-мишени

Вещество	Орган-мишень	
	Расчетные данные	Литературные данные
Бенз(а)пирен	Молочная железа, лёгкие, желудок, предстательная железа, пищевод	Молочная железа [45] Лёгкие, желудок, щитовидная железа [48] Предстательная железа, пищевод [16]
Формальдегид	Лейкемия, гортань	Слизистая оболочка верхних дыхательных путей, носоглотка, лейкемия [46] Усиливает канцерогенез, вызванный бенз(а)пиреном [49]
Никель	Легкие, желудок, гортань	Носоглотка, легкие [50] Желудок, гортань, носоглотка [51]
Этилбензол	Ротовая полость, печень, яичники	У лабораторных животных – полость носа и рта, печень, легкие, почки, щитовидная железа, яичники [46]

Таблица 4

Временные лаги воздействия загрязняющих веществ на смертность от онкологических заболеваний

Орган-мишень	Канцерогенное вещество, временной лаг (годы)			
	Бенз(а)пирен	Формальдегид	Никель	Этилбензол
Пищевод	0,3	–	–	–
Желудок	8–12	–	9–11	–
Трахея, бронхи, легкие	5–6	–	2,5	–
Грудная железа	0–2	–	–	–
Предстательная железа	0–3	–	–	–
Лейкемия	–	2, 4, 7–9	–	–
Гортань	–	7	7	–
Ротовая полость	–	–	–	3
Печень	–	–	–	0–3
Яичники	–	–	–	0–1

Также выявлены зависимости между содержанием никеля и заболеваниями некоторых органов-мишеней, причем с задержкой на период от 5 до 11 лет, несмотря на то, что концентрации этого вещества не превышали ПДК. Хотя общая методология оценки риска как раз придерживается идеи о беспороговом влиянии канцерогенов на здоровье человека [53].

5. Заключение

Проведенные исследования показывают, что выделить один источник, ответственный за канцерогенное загрязнение атмосферного воздуха в г. Красноярске, в целом не представляется возможным. Канцерогенная опасность выбросов предприятий машиностроительной отрасли характеризуется наличием никеля, предприятий алюминиевой промышленности – бенз(а)пирена. Эти вещества можно рассматривать как индикаторы выбросов соответствующих отраслей промышленности. При этом необходимо принимать во внимание, что никель и бенз(а)пирен – не единственные компоненты в выбросах этих предприятий, обладающие канцерогенным эффектом для здоровья населения. Но в системе государственного мониторинга качества атмосферного воздуха другие канцерогенные вещества, связанные с этими источниками, не определяются.

Наличие значимой связи показателей смертности населения с выбросами веществ, у которых концентрации не превышают установленные нормативы (например, никель и этилбензол), означает, что при оценке показателей здоровья и смертности населения опираться на значения ПДК недостаточно.

Результаты расчетов показали, что каждое влияющее вещество и орган-мишень связаны определенным характерным временным лагом. Это означает, что оценка системы «окружающая среда – здоровье человека» должна проводиться с учетом времени «запаздывания» или временного лага.

В ходе дальнейших исследований предполагается использование методов многомерной статистики и интеллектуальной обработки данных для оценки показателей состояния здоровья населения под влиянием всего перечня определяемых в воздухе города загрязняющих веществ [54].

Благодарности. Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-06-00256).

Acknowledgments. The work is fulfilled with the support of the Russian Foundation of Fundamental Researches (project 14-06-00256).

Библиографические ссылки

1. Музалевский А. А., Карлин Л. Н. Экологические риски: теория и практика. СПб. : РГГМУ, 2011. 448 с.

2. Сугак Е. В., Войнов Н. А., Николаев Н. А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. 2-е изд. Казань : Отечество, 2009. 224 с.

3. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н., Кузнецов Е. В. Вычислительные и информационные технологии анализа и оценки социально-экологических рисков // Экология и промышленность России. 2008. № 8. С. 24–29.

4. Нуров А. У., Гайдарова У. М., Дестебекова Э. Н. О значении некоторых факторов в возникновении злокачественных новообразований кожи // Вест. дермат. и венерол. 1991. № 2. С. 33–376.

5. Здравоохранение в г. Красноярске в 2012 году / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю // Статистический бюллетень. Красноярск, 2013. № 8–5.2. 15 с.

6. Онкологическая заболеваемость среди лиц молодого возраста в г. Красноярске / Ю. А. Дыхно [и др.] // Вопросы онкологии. 1999. № 5. С. 501–503.

7. Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации : постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 25 и Главного государственного инспектора РФ по охране природы № 03-19/24-3483 от 10 ноября 1997 года.

8. Сугак Е. В. Современные методы оценки экологических рисков // European Social Science Journal (Европейский журнал социальных наук). 2014. Т. 2, № 5 (44). С. 427–433.

9. Состояние загрязнения атмосферного воздуха городов на территории Красноярского края, Республик Хакасия и Тыва в 2010 г. : ежегодник / Красноярск. 2011. 116 с

10. Угляница К. Н., Луд Н. Г., Угляница Н. К. Общая онкология. Гродно : ГрГМУ, 2007. 818 с.

11. Абисатов Х. А. Клиническая онкология. Алматы : Арыс, 2007. Т. I. 608 с.

12. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: исследование зависимостей : справ. изд. М. : Финансы и статистика. 1985. 487 с.

13. Шальнов М. А. Рак: у вас есть время. Екатеринбург : У-Фактория, 2009. 224 с.

14. Черенков В. Г. Клиническая онкология. М. : МК, 2010. 434 с.

15. Хисматуллина З. Н. Особенности этапов химического, физического и вирусного канцерогенеза // Вестн. КТУ. 2013. Т. 16, № 7. С. 198–202.

16. Рашитов Л. З., Галлямов А. Б. Изучение влияния уровня содержания бенз(а)пирена в атмосферном воздухе на показатели онкологической заболеваемости населения Казани // Фундаментальные исследования. 2010. № 11. С. 109–111.

17. Онкология : учеб. пособие / Н. Н. Антоненкова [и др.]; под общ. ред. И. В. Залуцкого. Минск : Выш. шк., 2007. 703 с.

18. Шабад Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М. : Медицина, 1973. 367 с.

19. Гарелик П. В., Макшанов И. Я., Угляница К. Н. Опухоли. Общие вопросы онкологии. Гродно, 1999. 56 с.

20. Глушков А. Н. Основы канцерогенеза, прогнозирования, профилактики, иммунодиагностики и биотерапии злокачественных опухолей : элективный курс лекций по онкологии для клинических ординаторов, интернов, врачей. Кемерово : КГМА, 2002. 87 с.

21. Косарев В. В., Бабанов С. А. Профессиональные болезни : учеб. пособие. М. : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2011. 252 с.

22. Ларин С. А. Комплексное воздействие техногенного загрязнения среды обитания на развитие онкопатологии у населения в регионе с развитой угледобывающей и углеперерабатывающей промышленностью : автореф. дис. … д-ра биол. наук. Томск, 2013. 41 с.

23. Базаров А. В. Автоматизированная информационная система мониторинга территориального распределения общего содержания озона по данным всемирного банка TOMS : автореф. дис. … канд. техн. наук. Барнаул, 2009. 25 с.

24. Шкуратова Т. А. Анализ и моделирование онкологической заболеваемости на основе устранения мультиколлинеарности и определения лагов : автореф. дис. … канд. мед. наук. Воронеж, 2006. 46 с.

25. СанПиН 1.2.2353-08. Канцерогенные факторы и основные требования к профилактике канцерогенной опасности.

26. Райхман Я. Г. Теоретические основы профилактики рака : моногр. Израиль, 2009. 350 с.

27. Кинетическая теория злокачественных онкологических и некоторых генно-обусловленных заболеваний / В. Е. Задов [и др.] // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2013. 4(92). С. 119–124.

28. Potylitsyna E., Taseiko O., Sugak E. Evaluation of carcinogenic risks of air pollution // History, Problems and Prospects of Development of Modern Civilization : Proceedings of the XVI International Academic Congress (Japan, Tokyo, 25–27 April 2015). Tokyo University Press, 2015. P. 418–425.

29. Бельская Е. Н., Сугак Е. В., Бразговка О. В. Прогнозирование социально-экологических рисков населения промышленного региона // Национальная ассоциация ученых (НАУ): ежемесячный науч. журн. 2015. № 5(10). С. 128–132.

30. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Экологические риски в промышленности // Тр. VI Всерос. конф. по финансово-актуарной математике и смежным вопросам «ФАМ-2007». Ч. 2. Красноярск : Гротеск, 2007. С. 90–98.

31. Тасейко О. В., Потылицына Е. Н., Сугак Е. В. Проблемы использования экологических рисков для нормирования качества атмосферного воздуха // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. В 3-х ч. Ч. 2. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 357–359.

32. Кросскорреляции в живых системах: анализ нейромагнитных сигналов коры головного мозга человека / С. А. Демин [и др.] // Научно-технический вестник Санкт-Петербург. ГУ информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 37. С. 202–212.

33. Scarano F., Riethmuller M. L. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete offset // Exp. Fluids. 1999. Vol. 26. P. 513–523.

34. Сугак Е. В., Окладникова Е. Н., Ермолаева Л. В. Информационные технологии управления социально-экологическим риском // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 4(21). С. 87–91.

35. Тасейко О. В., Потылицына Е. Н., Сугак Е. В. Проблемы оценки экологических рисков от загрязнения атмосферного воздуха // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес–Наука–Общество». 2014. Ч. 4. С. 145–148.

36. Бельская Е. Н., Бразговка О. В., Сугак Е. В. Методика расчета экологических рисков [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1–8 URL: http://www.science-education.ru.

37. Потылицына Е. Н., Тасейко О. В., Сугак Е. В. Методы оценки влияния вредных факторов окружающей среды на здоровье населения // Решетневские чтения : Мататериалы XVIII Междунар. науч. конф. В 3-х ч. Ч. 2 / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 353–355.

38. Потылицына Е. Н., Липинский Л. В., Сугак Е. В. Использование искусственных нейронных сетей для решения прикладных экологических задач [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и обра-

зования. 2013. № 4. С. 1–8. URL: http://www.science-education.ru/110-9779.

39. Потылицына Е. Н., Тасейко О. В., Сугак Е. В. Современные методы оценки влияния вредных факторов окружающей среды на здоровье населения // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Тамбов : Изд-во ТРОО «Бизнес–Наука–Общество». 2014. Ч. 4. С. 125–129.

40. Автоматическое генерирование нейросетевых моделей в задаче прогнозирования уровня заболеваемости населения / Д. И. Хритоненко [и др.] // XIV Национальная конф. по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2014). Казань : РИЦ «Школа», 2014. С. 276–285.

41. Проектирование коллективов нейросетевых предикторов экологического состояния города самоконфигурируемыми эволюционными алгоритмами / Д. И. Хритоненко [и др.] // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2014) : Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Кемерово : КемГУ, 2014. С. 438–439.

42. Решение задачи прогнозирования экологического состояния города нейроэволюционными алгоритмами / Д. И. Хритоненко [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 1. С. 137–142.

43. Нидюлин В. А. Комплексная оценка распространенности злокачественных новообразований в Калмыкии : автореф. … д-ра мед. наук. М., 2007. 53 с.

44. Тасейко О. В., Сугак Е. В. Репрезентативность пунктов наблюдения при оценке качества воздуха в городской среде [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1–11. URL: http://www.science-education.ru/120-15560. ISSN 2070-7428.

45. Химия загрязняющих веществ и экология : моногр. / В. Н. Вернигорова [и др.]. М. : Палеотип, 2005. 240 с.

46. Ethylbenzene [Электронный ресурс]. URL: http://monographs.iarc.fr/ENG/ Monographs/vol77/ mono77-10.pdf (дата обращения: 17.05.2015).

47. Сводные тома предельно допустимых выбросов для городов Красноярского края, [Электронный ресурс] 2012. URL: http://www.krasecology.ru/About/ PDV (дата обращения: 15.05.2015).

48. Вредные вещества в промышленности : справ. для химиков, инженеров и врачей. В 3 т. Т. 1. Органические вещества / под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. 7-е изд., пер. и доп. Л. : Химия, 1976. 592 с.

49. Бенз(а)пирен в атмосферном воздухе и онкологическая заболеваемость в Кемерово / С. А. Мун [и др.] // Гигиена и санитария. 2006. № 4. С. 28–30.

50. Ревич Б. А., Авалиани С. Л., Тихонова Г. И. Экологическая эпидемиология. М. : Академия, 2004. 327 с.

51. Смола В. И. ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. В 2-х ч. Ч. 1. М. : Полиграф сервис, 2013. 384 с.

52. Бингам Ф. Т., Коста М., Эйхенбергер Э. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / пер. с англ. под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М. : Мир, 1993. 368 с.

53. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду.

54. Сугак Е. В., Бразговка О. В., Бельская Е. Н. Техногенные социально-экологические риски населения промышленного региона. Актуальные направления научных исследований начала XXI века : сб. науч. трудов. Ростов н/Д. : Изд-во Междунар. исследовательского центра «Научное сотрудничество», 2015. С. 13–24.

References

1. Muzalevskiy A. A., Karlin L. N. *Ekologicheskie riski: teoriya i praktika* [Environmental risks: theory and practice]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2011, 448 p. (In Russ.).

2. Sugak E. V., Voynov N. A., Nikolaev N. A. *Ochistka gazovyikh vyibrosov v apparatakh s intensivnyimi gidrodinamicheskimi rezhimami* [Cleaning of gas emissions in devices with the intensive hydrodynamic modes]. Kazan, Otechestvo Publ., 2009, 224 p. (In Russ.).

3. Sugak E. V., Okladnikova E. N., Kuznetsov E. V. [Computing and information technologies of the analysis and assessment of social-and-ecological risks]. *Ekologiya i promyishlennost Rossii*. 2008, No. 8, P. 24–29 (In Russ.).

4. Nurov A. U., Gaydarova U. M., Destebekova E. N. [About value of some factors in emergence of malignant new growths of skin]. *Vest. dermat. i venerol*. 1991, No. 2, P. 33–376 (In Russ.).

5. [Health in Krasnoyarsk in 2012 / territorial body of the Federal State Statistics Service of the Krasnoyarsk Territory]. *Statisticheskiy byulleten'*. Krasnoyarsk, 2013, No. 8-5.2, 15 p. (In Russ.).

6. Dykhno Yu. A., Ivanova Yu. D., Laletina I. V., Khlebopros R. G. [Oncological incidence among persons of young age in Krasnoyarsk]. *Voprosy onkologii*. 1999, No. 5, P. 501–503 (In Russ.).

7. *Ob ispolzovanii metodologii otsenki riska dlya upravleniya kachestvom okruzhayuschey sredyi i zdorovya naseleniya v Rossiyskoy Federatsii. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF №. 25 i Glavnogo gosudarstvennogo inspektora RF po okhrane prirodyi № 03-19/24-3483 ot 10 noyabrya 1997 goda.* [About the use of risk assessment methodology for the management of environmental quality and public health in the Russian Federation. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation № 25 and the Chief State Inspector of the Russian Federation for the Protection of Nature № 03-19 / 24-3483 of 10 November 1997.].

8. Sugak E. V. [Modern methods of an assessment of environmental risks]. *European Social Science Journal*. 2014, Vol. 2, No. 5 (44), P. 427–433 (In Russ.).

9. *Ezhegodnik "Sostoyanie zagryazneniya atmosfernogo vozdukha gorodov na territorii Krasnoyarskogo kraya, respublik Khakasiya i Tyva v 2010 g."* [Yearbook "The state of air pollution in the cities of Krasnoyarsk Territory, Khakassia and Tuva republic in 2010"]. Krasnoyarsk, 2011, 116 p.

10. Uglyanitsa K. N., Lud N. G., Uglyanitsa N. K. *Obshchaya onkologiya* [General oncology: Manual]. Grodno, GrGMU Publ., 2007, 818 p. (In Russ.).

11. Abisatov X. A. *Klinicheskaya onkologiya* [Clinical oncology]. Almaty, Arys Publ., 2007, Vol. I, 608 p. (In Russ.).

12. Ayvazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. *Prikladnaya statistika*: *Issledovanie zavisimostey: Sprav. Izd* [Applied statistics: Research of dependences]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1985, 487 p. (In Russ.).

13. Shal'nov M. A. *Rak: u vas est' vremya* [Cancer: you have time]. Ekaterinburg, U-Faktoriya Publ., 2009, 224 p.

14. Cherenkov V. G. *Klinicheskaya onkologiya: ucheb. posobie dlya sistemy poslediplo. obrazovaniya vrachey* [Clinical oncology: studies. a grant for system of postdegree education of doctors.]. Moscow, MK Publ., 2010, 434 p.

15. Khismatullina Z. N. [Features of stages of chemical, physical and virus carcinogenesis]. *Vestn. KTU*. 2013, Vol. 16, No. 7, P. 198–202 (In Russ.).

16. Rashitov L. Z., Gallyamov A. B. [Studying of influence of level of the contents of benzopyrene in atmospheric air on indicators of oncological incidence of the population of Kazan]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2010, No. 11, P. 109–111 (In Russ.).

17. Antonenkova H. N. *Onkologiya* [Oncology]. Ed. I. V. Zalutskogo. Minsk, Vysh. shk. Publ., 2007, 703 p.

18. Shabad L. M. *O tsirkulyatsii kantserogenov v okruzhayushchey srede* [About circulation of carcinogens in environment]. Moscow, Meditsina Publ., 1973, 367 p.

19. Garelik P. V., Makshanov I. Ya., Uglyanitsa K. N. *Opukholi. Obshchie voprosy onkologii* [Tumors. General questions of oncology]. Grodno, 1999, 56 p.

20. Glushkov A. N. *Osnovy kantserogeneza, prognozirovaniya, profilaktiki, immunodiagnostiki i bioterapii zlokachestvennykh opukholey: elektivnyy kurs lektsiy po onkologii dlya klinicheskikh ordinatorov, internov, vrachey* [Bases of carcinogenesis, forecasting, prevention, immunodiagnostics and biotherapy of malignant tumors: an elective course of lectures on oncology for clinical interns, interns, doctors]. Kemerovo, KGMA Publ., 2002, 87 p.

21. Kosarev V. V., Babanov S. A. *Professional'nye bolezni* [Professional diseases]. Moscow, Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M Publ., 2011, 252 p.

22. Larin S. A. *Kompleksnoe vozdeystvie tekhnogennogo zagryazneniya sredy obitaniya na razvitie onkopatologii u naseleniya v regione s razvitoy ugledobyvayushchey i uglepererabatyvayushchey promyshlennost'yu. Dis. dok. biol. nauk* [Complex impact of technogenic pollution of habitat on development of an oncopathology in the population in the region with the developed coal-mining industry. Dr. biol. sci. diss]. Tomsk, 2013, 41 p.

23. Bazarov A. V. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema monitoringa territorial'nogo raspredeleniya obshchego soderzhaniya ozona po dannym vsemirnogo banka TOMS. Dis. dok. tehn. nauk* [The automated information system of monitoring of territorial distribution of the general content of ozone according to the world bank TOMS. Kand. tech. sci. diss]. Barnaul, 2009, 25 p.

24. Shkuratova T. A. *Analiz i modelirovanie onkologicheskoy zabolevaemosti na osnove ustraneniya mul'tikollinearnosti i opredeleniya lagov. Dis. kand. med. nauk* [The analysis and modeling of oncological incidence on the basis of elimination of a multicollinearity and definition of logs. Kand. med. sci. diss]. Voronezh, 2006, 46 p.

25. *SanPiN 1.2.2353–08. Kantserogennye faktory i osnovnye trebovaniya k profilaktike kantserogennoy opasnosti.* [Cancerogenic factors and main requirements to prevention of cancerigenic danger. Sanitary and epidemiologic rules and standards 1.2.2353–08] (In Russ.).

26. Raykhman Ya. G. *Teoreticheskie osnovy profilaktiki raka* [Theoretical bases of prevention of a cancer]. Monografiya. Izrail', 2009, 350 p.

27. Zadov V. E., Shumbasov M. A., Tarskikh M. M., Kolesnikov S. I. [Kinetic theory malignant oncological and some genetic diseases]. *Byulleten' VSNTs SO RAMN*. 2013, No. 4(92), P. 119–124 (In Russ.).

28. Potylitsyna E., Taseiko O., Sugak E. Evaluation of carcinogenic risks of air pollution. *Proceedings of the XVI International Academic Congress "History, Problems and Prospects of Development of Modern Civilization*" (Japan, Tokyo, 25–27 April 2015). Tokyo University Press. 2015, P. 418–425 (In Russ.).

29. Belskaya E. N., Sugak E. V., Brazgovka O. V. [Forecasting of social-and-ecological risks of the population of the industrial region]. *Natsionalnaya assotsiatsiya uchenyih, Ezhemesyachnyiy nauchnyiy zhurnal*. 2015, No. 5(10), P. 128–132 (In Russ.).

30. Okladnikova E. N., Sugak E. V. [Environmental risks in the industry]. *Tr. VI Vseross. konf. po finansovo-aktuarnoy matematike i smezhnyim voprosam "FAM-2007"* [Proc VIth of the All-Russian conference on financial and actuarial mathematics and related issues of "FAM-2007"]. Ch. 2. Krasnoyarsk, Grotesk Publ., 2007, P. 90–98 (In Russ.).

31. Taseiko O. V., Potyilitsyina E. N., Sugak E. V. [Problems of using of environmental risks for rationing of air quality]. *Reshetnevskie chteniya: Mat. XVIII Mezhd. Nauchnoy konferentsii* [Proc. XVIIIth Int. Scientific conference "Reshetnev readings"]. V 3 ch. Ch. 2. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2014, P. 357–359 (In Russ.).

32. Demin S. A., Zaripov R. R., Panishchev O. Yu., Yul'met'ev R. M. [Cross-correlations in live systems: Analysis of neuromagnetic signals of a cerebral cortex of the person]. *Nauchno- tekhnicheskiy vestnik SP-b GU informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2007, No. 37, P. 202–212 (In Russ.).

33. Scarano F., Riethmuller M. L. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete offset. *Exp. Fluids.* 1999, Vol. 26, P. 513–523 (In Russ.).

34. Sugak E. V., Okladnikova E. N., Ermolaeva L. V. [Information technologies of social-ecological risk management]. *Vestnik SibGAU,* 2008 No. 4(21), P.87–91 (In Russ.).

35. Taseiko O. V., Potyilitsyina E. N., Sugak E. V. [Problems of an assessment of environmental risks from air pollution]. *Nauka, obrazovanie, obschestvo: problemy i perspektivy razvitiya. Sb. Nauchn. Trudov po mat. Mezhd. nauchno-praktich. konf* [Proc. of the International scientific and practical conference "Science, education, society: problems and prospects of development"]. Ch. 4.

Tambov, Biznes-Nauka-Obschestvo Publ., 2014, P. 145–148 (In Russ.).

36. Belskaya E. N., Brazgovka O. V., Sugak E. V. [Method of calculation of environmental risks]. *Sovremennyie problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, No. 6, P. 1–8. Available at: http://www.science-education.ru (accessed: 22.11.2012).

37. Potyilitsyina E. N., Taseiko O. V., Sugak E. V. [Methods of an assessment of influence of harmful factors of environment on health of the population]. *Reshetnevskie chteniya: Mat. XVIII Mezhd. nauchnoy konferentsii* [Proc. XVIIIth Int. Scientific conference "Reshetnev readings"]. V 3 ch. Ch. 2. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2014, P. 353–355 (In Russ.).

38. Potyilitsyina E. N., Lipinskiy L. V., Sugak E. V. [Use of artificial neural networks for the solution of applied ecological tasks]. *Sovremennyie problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, No. 4. P. 1–8. (In Russ.) Available at: http://www.science-education.ru/110-9779 (accessed: 22.12.2013).

39. Potyilitsyina E. N., Taseiko O. V., Sugak E. V. [Modern methods of an assessment of influence of harmful factors of environment on the population health]. *Nauka, obrazovanie, obschestvo: problemy i perspektivy razvitiya. Sb. Nauchn. Trudov po mat. Mezhd. nauchno-praktich. konf* [Proc. of the International scientific and practical conference "Science, education, society: problems and prospects of development"]. Ch. 4. Tambov, Biznes-Nauka-Obschestvo Publ., 2014, P. 125–129 (In Russ.).

40. Hritonenko D. I., Semenkin E. S., Sugak E. V. [Automatic generation of neural network models in a problem of forecasting of an incidence of the population]. *XIV Natsionalnaya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnyim uchastiem (KII-2014). Trudy konferentsii* [Proc. XIV National conference on artificial intelligence with the international participation (KII-2014)]. Kazan, Shkola Publ., 2014, P. 276–285 (In Russ.).

41. Hritonenko D. I., Semenkin E. S., Potyilitsyina E. N. [Design of collectives of neural network predictors of ecological conditions of the city the self-configured evolutionary algorithms]. *Informatsionno-telekommunikatsionnyie sistemy i tehnologii (ITSiT-2014): Mat. Vseross. nauchno-praktich. konf.* [Proc. All-Russian scientific and practical conference 'Information and telecommunication systems and technologies (ITSIT-2014)':]. Kemerovo, KemGU Publ., 2014, P. 438–439 (In Russ.).

42. Hritonenko D. I., Semenkin E. S., Potyilitsyina E. N. [Solution of a problem of forecasting of an ecological condition of the city neuroevolutionary algorithms]. *Vestnik SibGAU*, Vol. 16, No. 1, P. 137–142 (In Russ.).

43. Nidyulin V. A. *Kompleksnaya otsenka rasprostranennosti zlokachestvennykh novoobrazovaniy v Kalmykii. Dis. dokt. med. nauk*. [Comprehensive assessment of the prevalence of malignant neoplasms in Kalmykia: Author. on competition uch. MD degree]. Moscow, 2007, 53 p. (In Russ.).

44. Taseiko O. V., Sugak E. V. [Representativeness of points of supervision at an assessment of quality of air in an urban environment]. *Sovremennyie problemy nauki i obrazovaniya*. 2014, No. 6, P. 1–11. (In Russ.). Available at: http://www.science-education.ru/120-15560. ISSN 2070-7428 (accessed 10.05.2015).

45. Vernigorova V. N., Makridin N. I., Sokolova Yu. A. *Khimiya zagryaznyayushchikh veshchestv i ekologiya: monografiya*. [Chemistry of the polluting substances and ecology: monograph]. Moscow, Paleotip Publ., 2005, 240 p. (In Russ.).

46. *Ethylbenzene.* (In Russ.). Available at: http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol77/mono77-10.pdf (accessed 17.05.2015).

47. *Svodnye toma predel'no dopustimykh vybrosov dlya gorodov Krasnoyarskogo kraya, 2012 god.* [Summary volume of maximum permissible emissions for the cities of Krasnoyarsk Territory, 2012]. (In Russ.) Available at: http://www.krasecology.ru/About/PDV (accessed: 15.05.2015).

48. *Vrednye veshchestva v promyshlennosti. Spravochnik dlya khimikov, inzhenerov i vrachey* [Harmful substances in the industry. The reference book for chemists, engineers and doctors]. Izd. 7-e, per. i dop. V trekh tomakh. Tom I. Organicheskie veshchestva. Pod red. N. V. Lazareva, E. N. Levinoy. L: "Khimiya", 1976, 592 p. (In Russ.).

49. Mun S. A. [et al.]. [Benz(o)pyrene in air and oncological incidence to Kemerovo]. *Gigiena i sanitariya*. 2006, № 4, p. 28–30 (In Russ.).

50. Revich B. A., Avaliani S. L., Tikhonova G. I. *Ekologicheskaya epidemiologiya* [Ecological epidemiology]. Moscow, Akademiya Publ., 2004, 327 p. (In Russ.).

51. Smola V. I. *PAU v okruzhayushchey srede: problemy i resheniya* [MAH in environment: problems and decisions]. V 2-kh ch. Ch. 1. Moscow, Poligraf servis Publ., 2013, 384 p. (In Russ.).

52. Bingam F. T., Kosta M., Eykhenberger E. *Nekotorye voprosy toksichnosti ionov metallov* [Some questions of toxicity of ions of metals]. Per.s angl. Pod red. Kh. Zigelya, A. Zigel'. Moscow, Mir Publ., 1993, 368 p. (In Russ.).

53. *R 2.1.10.1920–04. Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [The guide to a risk assessment for health of the population at influence of the chemicals polluting environment].

54. Sugak E. V., Brazgovka O. V., Belskaya E. N., [Man-caused social and environmental risks of the population of the industrial region]. *Recent research directions beginning of the XXI century. Collection of research papers. Rostov-on-Don: Publishing House of the International Research Center "Scientific cooperation". 2015. P. 13–24* (In Russ.).

© Потылицына Е. Н., Тасейко О. В., Сугак Е. В. 2015

УДК 539.12.04

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 969–974

ГЕТЕРОГЕННЫЙ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С. В. Телегин, В. Н. Саунин, О. Н. Драганюк, М. Н. Драганюк

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

Рассмотрено моделирование элементного состава слоев и свойств гетерогенных (многослойных) защитных экранов бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии излучений естественных радиационных поясов Земли, которые приводят к сбоям в полупроводниковых элементах электронной аппаратуры и выходу из строя космического аппарата в целом. Рассмотрены 4 различные конструкции экрана и проведен сравнительный анализ с основным радиационно-защитным материалом для космических аппаратов – алюминием. Для экранов были выбраны материалы, обладающие высокими сечениями реакций и невысокой плотностью среди легких и тяжелых химических элементов. Массовые коэффициенты ослабления боросодержащих веществ на 20 % больше, чем у алюминия. Гетерогенные экраны состоят из трех слоев: стеклоткань, боросодержащий материал, никель. Использование в защитном экране тяжелого метала позволяет добиться уменьшения тормозного излучения на выходе. Количество прошедших через такой экран гамма-квантов в 4 раза меньше, чем в алюминии. Толщины рассматриваемых экранов – 5,95 и 6,2 мм. Проведен сравнительный анализ однородных и многослойных защитных композиций с одинаковым химическим составом. Выявлены преимущества гетерогенного защитного экрана над однородными аналогами и алюминием по массе и экранирующим свойствам. Расчеты дозовых характеристик и пропускающей способности проводились методом Монте-Карло. Наиболее эффективным радиационно-защитным экраном по результатам работы является трехслойная композиция с использованием карбида бора. Поглощенная доза такого экрана в 2 раза меньше, чем у алюминиевого аналога; число прошедших за экран гамма-квантов меньше в 4 раза. Также гетерогенный экран будет иметь массу на 10 % меньше, чем алюминиевый, при одинаковом коэффициенте ослабления потока электронов. Такие гетерогенные экраны могут использоваться для защиты космических аппаратов, выводимых на геостационарную орбиту. Причем возможно нанесение защитных покрытий из боросодержащего материала и никеля на уже изготовленные корпуса космических аппаратов.

Ключевые слова: радиационная защита, композиционный материал, моделирование, поток электронов, экранирующая способность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 969–974

THE HETEROGENEOUS RADIATION SHIELD FOR SPACECRAFTS

S. V. Telegin, V. N. Saunin, O. N. Draganyuk, M. N. Draganyuk

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

The paper deals with modeling of elemental composition and properties of heterogeneous layers in multilayered shields to protect spacecraft onboard equipment from radiation emitted by the natural Earth's radiation belt. This radiation causes malfunctioning of semiconductor elements in electronic equipment and may result in a failure of the spacecraft as a whole. We consider four different shield designs and compare them to the most conventional radiation-protective material for spacecraft – aluminum. Out of light and heavy chemical elements we chose the materials with high reaction cross sections and low density. The mass attenuation coefficient of boron-containing compounds is 20 % higher than that of aluminum. Heterogeneous shields consist of three layers: a glass cloth, borated material and nickel. With a protective shield containing heavy metal the output bremsstrahlung can be reduced. The amount of gamma rays that succeed to penetrate the shield is 4 times less compared to aluminum. The shields under study have the thicknesses of 5.95 and 6.2 mm. A comparative analysis of homogeneous and multilayered protective coatings of the same chemical composition has been performed. A heterogeneous protective shield has been found to be advantageous in weight and shielding properties over its homogeneous counterparts and aluminum. The dose characteristics and transmittance were calculated by the Monte Carlo method. The results of our study lead us to conclude that a three-layer boron

carbide shield provides the most effective protection from radiation. This shield ensures twice as low absorbed dose and 4 times less the number of penetrated gamma-ray photons compared to its aluminum analogue. Moreover, a heterogeneous shield will have a weight 10 % lighter than aluminum, with the same attenuation coefficient of the electron flux. Such heterogeneous shields can be used to protect spacecraft launched to geostationary orbit. Furthermore, a protective boron-containing and nickel coating can be deposited onto a finished housing frame of space equipment.

Keywords: radiation protection, composite material. modeling, the flow of electrons, the shielding ability.

Введение. Необходимость защиты электронных блоков спутников обусловлена влиянием космического излучения на орбите, способного нарушить работу навигационных и телекоммуникационных систем космического аппарата (КА) [1; 2]. Подраздел Федеральной космической программы России «Космические средства для фундаментальных космических исследований» предусматривает проведение мероприятий по созданию «космических комплексов и приборов для исследования Фобоса, Марса, Венеры, Луны». Страны Европы, США и Китай существенно активизируют работы по подготовке пилотируемых полетов к Луне, Марсу, а также по последующему освоению этих космических тел. Один из важных этапов такой подготовки заключается в моделировании воздействий ионизирующих излучений на различные материалы с целью разработки новых комбинаций защитных экранов [3–8].

В большинстве случаев в качестве защитного экрана используется корпус электронного блока, изготовленный из алюминия или его сплавов. Задача исследовательских работ в области защиты КА от ионизирующего излучения состоит в том, чтобы создать экран, обладающий лучшими защитными свойствами и меньшей массой, чем алюминиевый аналог [9]. При анализе свойств материалов в качестве основных выбираются характеристики, такие как поглощенная доза, массовая толщина, массовый коэффициент ослабления, количество прошедших частиц.

Методика эксперимента. Для обеспечения надежности систем управления спутника эффективнее всего применять гетерогенные защитные экраны, изготовленные из материалов, способных поглощать или рассеивать излучение [10]. Наиболее опасным на геостационарной орбите является ионизирующее излучение потока электронов естественных радиационных поясов Земли [11]. Количество солнечных и галактических частиц намного меньше, что позволяет получать удовлетворительные данные при моделировании излучения как пучка электронов с энергиями 0,04–5 МэВ методом Монте Карло.

При выборе материалов необходимо учитывать их физические свойства, в частности, сечения реакции [12]. При увеличении атомного номера химического элемента увеличиваются потери энергии первичными электронами, но в то же время в материалах из тяжелых элементов с увеличением толщины возникает тормозное излучение. Таким образом, при моделировании защитного экрана имеет смысл рассматривать элементы разных групп [13]. Создание гетерогенного экрана со слоями различной плотности позволяет создать экран, обладающий преимуществами, которые рассмотрены на примере двух моделей.

Защитный экран состоит из трех слоев (табл. 1), вещества в котором располагаются по мере возрастания плотности. Для внешнего слоя (конструкционного) использовалась стеклоткань марки Т-10 [14], содержащая в своем химическом составе оксиды алюминия, кремния, бора и имеющая больший коэффициент ослабления, чем алюминий. Второй слой – соединение с бором (рассмотрены экраны с карбидом бора и тетраборатом натрия). Слой из никеля обладает наибольшей плотностью и, соответственно, расположен последним. Выбор данных материалов обусловлен значениями сечений реакций в этих веществах. Из недорогих, легких и доступных материалов самое большое сечение захвата фотонов, равное $0{,}0092 \cdot 10^{-24}$ см^2, и сечение рассеяния ($3{,}6 \cdot 10^{-24}$ см^2) имеет бор [12]. Никель обладает лучшими характеристиками: сечение захвата, равное $4{,}43 \cdot 10^{-24}$ см^2, сечение рассеяния $17{,}3 \cdot 10^{-24}$ см^2, что на порядок больше значений сечений реакций других тяжелых элементов, например меди, при приблизительно одной плотности веществ. Благодаря таким параметрам никель является хорошим материалом защиты от гамма-излучения и поэтому эффективен в качестве последнего слоя защиты [15].

Таблица 1

Структура защитных экранов

Экран/слои	1,7 мм	2,75/2,5 мм	1,75 мм
1	Стеклоткань	B_4C	Ni
2	Стеклоткань	$B_4Na_2O_7$	Ni

Толщины слоев соответствуют слоям половинного ослабления и составляют 2,75 / 2,5 мм для боросодержащего покрытия, 1,75 мм – для слоя с использованием никеля, 1,7 мм – для стеклоткани.

Связующим веществом была выбрана эпоксидная смола, составляющая 20–30 % от всего экрана.

Результаты и обсуждение. Экранирующие свойства используемых материалов представлены в табл. 2. Для никеля и боросодержащих веществ расчеты проведены с учетом весового содержания эпоксидной смолы (25 % в слоях с бором, 20 % в слое с никелем). Количество прошедших частиц через экран нормируется на одну частицу.

Массовый коэффициент ослабления уменьшается с ростом плотности вещества (его массовой толщины) и увеличивается при уменьшении количества прошедших частиц. Боросодержащие материалы и стеклоткань имеют больший массовый коэффициент ослабления потока электронов, чем алюминий, что подтверждает целесообразность использования их в защитном экране. Никель из-за высокой плотности хуже взаимодействует с электронами, но имеет другие преимущества, рассмотренные ниже.

Также сравнение свойств материалов показало, что однородный экран с аналогичным гетерогенному химическим составом имеет массовый коэффициент ослабления на 20 % выше, чем алюминий.

Для изучения вклада каждого слоя в ослабление излучения была рассмотрена зависимость числа прошедших частиц (электронов) от толщины экрана (рис. 1). Близкий угол наклона участков, соответствующих различным слоям, свидетельствует об их оптимизированном выборе по толщине.

В табл. 3 представлены численные значения количества прошедших электронов (нормировка на 1 частицу) и массовые коэффициенты ослабления каждого слоя. Также вычислены характеристики однородных экранов. Значения массовых коэффициентов ослабления близки друг к другу, поэтому при выборе структуры будут учитываться технологические факторы. Слои с боросодержащим материалом и никелем могут наноситься на уже изготовленные корпуса приборов космических аппаратов, что делает гетерогенный экран более универсальным. В сравнении с характеристиками экрана из алюминия все рассмотренные композиции имеют преимущество.

В исследовании параметров защитных экранов при одинаковом ослаблении потока электронов были рассмотрены коэффициенты отношения по вторичному излучению (доле прошедших через все слои гамма-квантов) и поглощенной дозе. Ослаблению в 10^6 раз потока электронов соответствует экран из алюминия толщиной 6 мм. При такой толщине поглощенная доза составляет 1,6E-11, а гетерогенные экраны имеют значения на порядок меньше. В табл. 4 представлены коэффициенты, равные отношению соответствующих параметров у гетерогенных экранов к алюминиевому.

Также были рассмотрены однородные экраны. Экран с тетраборатом натрия имеет ослабление по поглощенной дозе на 10 % меньше, чем алюминий, тогда как гетерогенные экраны превосходят его значение в 2 раза.

Исследуемые экраны пропускают в 4–5 раз меньше гамма-квантов, образованных в результате тормозного излучения. Это обусловлено наличием в составе экранов тяжелого металла – никеля. На рис. 2 видно, что число частиц вторичного излучения резко уменьшается на промежутке от 4,2 мм, что соответствует слою никеля.

Для сравнения экранов по доле прошедших электронов была вычислена реальная толщина слоя алюминия (табл. 5). Она равна сумме толщин, соответствующих массовой толщине каждого слоя в многослойном экране. При толщине в 5,3 мм алюминий задерживает электроны в 1,7–2 раза хуже, чем исследуемые гетерогенные экраны.

Таблица 2

Сравнение свойств материалов

Вещество	Плотность, кг/м^3	Толщина, м	Массовая толщина, кг/м^2	Доля прошедших электронов	Массовый коэффициент ослабления, м^2/кг
$B_4Na_2O_7$	1904	0,001	1,904	0,0069	2,6088
B_4C	1881	0,001	1,881	0,0079	2,5684
Т-10	1596	0,001	1,596	0,0071	3,0270
Ni	3898	0,001	3,898	0,0006	1,9044
Al	2700	0,001	2,7	0,0031	2,1384
Однородный экран с $B_4Na_2O_7$	2156,4	0,001	2,1564	0,0044	2,5146
Однородный экран с B_4C	2134,4	0,001	2,1344	0,0032	2,6873

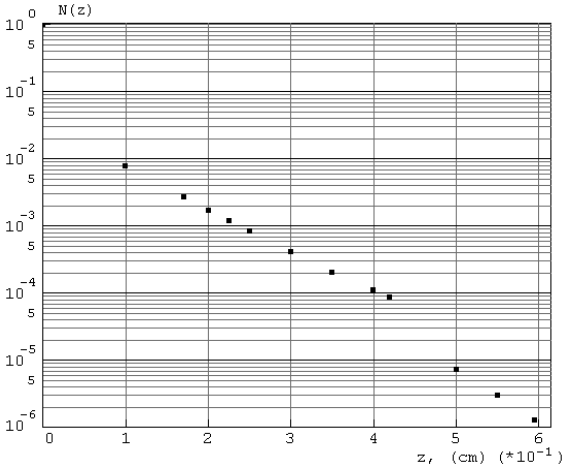


Рис. 1. Зависимость числа электронов от толщины гетерогенного экрана с использованием $B_4Na_2O_7$ (нормировка на 1 частицу; масштаб по оси ординат логарифмический)

Таблица 3

Послойное сравнение свойств материалов в гетерогенных экранах

Экран	Вещество	Плотность, кг/м^3	Толщина, мм	Массовая толщина, кг/м^2	Доля прошедших электронов	Массовый коэффициент ослабления, м^2/кг
1	Стеклоткань	1596	1,70	2,7132	2,541E-03	2,202
	$B_4Na_2O_7$	1904	2,50	4,76	3,388E-02	0,711
	Ni	3898	1,75	6,8215	3,840E-05	1,491
	Весь экран	2156,4*	5,95	12,8306*	1,301E-06	1,056*
2	Стеклоткань	1596	1,70	2,7132	2,541E-03	2,202
	B_4C	1881	2,75	5,1726	3,143E-02	0,669
	Ni	3898	1,75	6,8215	3,801E-05	1,492
	Весь экран	2134,4*	6,20	13,2333*	1,195E-06	1,031*
3	Однородный экран с $B_4Na_2O_7$	2156,4	5,95	12,8306	2,900E-06	0,994
4	Однородный экран с B_4C	2134,4	6,20	13,2333	1,022E-06	1,042
5	Алюминий	2700	5,29	14,2947	2,641E-06	0,899

* – среднее значение.

Таблица 4

Сравнение вторичного излучения и поглощенной дозы

Вещество	Толщина, мм	Доля прошедших гамма-квантов	Поглощенная доза, мкГр	Отношение по вторичному излучению	Отношение по поглощенной дозе
Алюминий	6	1,46E-3	1,55E-11		
$B_4Na_2O_7$+T10+Ni	5,95	4,3E-4	7,82E-12	3,4068	1,9873
B_4C+T10+Ni	6,2	3,4E-4	7,19E-12	4,2826	2,1590
Однородный экран с $B_4Na_2O_7$	5,95	3,2E-4	1,65E-11	4,6256	0,9398
Однородный экран с B_4C	6,2	2,5E-4	6,06E-12	5,8462	2,5643

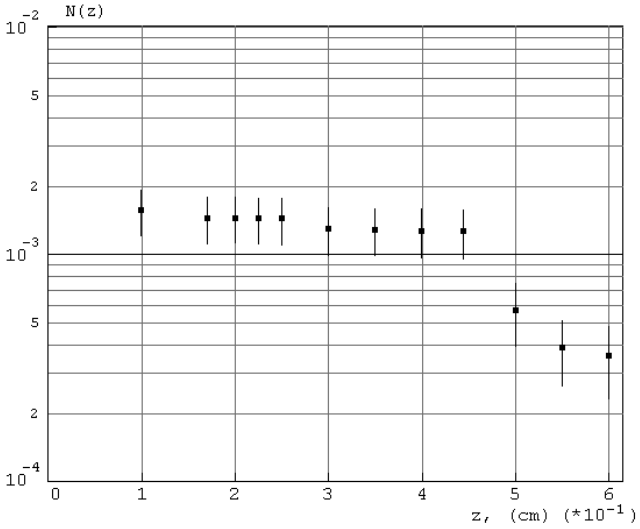


Рис. 2. Зависимость числа гамма-квантов от толщины гетерогенного барьера с использованием B_4C (нормировка на 1 частицу; масштаб по оси ординат логарифмический)

Таблица 5

Вычисление коэффициента отношения по доле прошедших электронов

Вещество	Толщина, мм	Доля прошедших электронов	Массовый коэффициент ослабления, м^2/кг	Отношение по защите
Алюминий	5,33	2,64E-06	0,899	2,03
$B_4Na_2O_7$+T10+Ni	5,95	1,30E-06		
B_4C+T10+Ni	6,20	1,19E-06		1,76
Алюминий	5,45	2,10E-06	0,889	

Важной характеристикой является масса защитного экрана, так как от ее величины зависит стоимость вывода спутника на орбиту и, как следствие, востребованность на рынке данного материала. Для получения конкретных значений в качестве примера рассматривалась модель в виде цилиндра радиусом 5 см. Высота цилиндра соответствует размерам из табл. 5.

Сравнение было проведено для экранов с одним количеством прошедших через защиту электронов (10^{-6} частицы). Коэффициент отношения по массе гетерогенного экрана к алюминиевому составил 0,9 (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение масс при одной доле пропущенных электронов, $N = 10^{-6}$

Вещество	Масса, г	Отношение по массе
Алюминий	127,23	
$B_4Na_2O_7$+T10+Ni	112,27	0,8823
B_4C+T10+Ni	115,51	0,9078

Из расчетов видно, что при всех ранее рассмотренных преимуществах исследуемые экраны являются более легкими, чем алюминиевые.

Заключение. В результате исследования были рассмотрены и рассчитаны в программе «Компьютерная лаборатория» [16] 5 различных комбинаций защитных экранов из материалов, имеющих высокую экранирующую способность и массовый коэффициент ослабления. Для однородных и гетерогенных экранов основным преимуществом по отношению к алюминию является меньшее тормозное излучение и меньшая масса. Экраны с использованием карбида бора имеют более высокие показатели, чем алюминий, по всем рассмотренным характеристикам.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации, № 169/14, и КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, № 169/14, and KGAU “Science and Technology Support Fund of Krasnoyarsk Region”.

Библиографические ссылки

1. Анашин В. С. Проблемы обеспечения высоких сроков активного существования РЭА спутников связи // Электросвязь. 2009. № 4. С. 19–22.

2. Кузнецов Н. В. Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов [Электронный ресурс]. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/crd3.htm 29/12/2014.

3. Модель космоса. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л. С. Новикова. 8-е изд. М. : Книжный дом «Университет», 2007. 1144 с.

4. Павленко В. И., Едаменко О. Д., Ястребинский Р. Н. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2011. № 3. С. 113–116.

5. Моделирование воздействий быстрых электронов на полимерные радиационно-защитные композиты / В. И. Павленко [и др.] // Радиационная физика твердого тела : тр. 22 Междунар. конф. / под ред. Г. Г. Бондаренко (9–14 июля 2012, г. Севастополь). С. 222–228.

6. ITS: the integrated TIGER series of electron/photon Monte Carlo transport codes Version 3.0. / J. A. Halbleib [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. 39 (4). P. 1025–1029.

7. Extrapolated ranges of electrons determined from transmission and projected-range straggling curves / Tatsuo Tabata [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 2002. № 64. P. 161–167.

8. Radiation shielding for a lunar base / J. Bell [et al.] // NationalAeronauticsandSpaceAdiminstratoin, 2011.

9. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. Тормозное излучение электронов в веществе космического аппарата. Методика расчета // Вопросы электромеханики. 2011. Т. 120. С. 37–44.

10. Радиационные воздействия на материалы космической техники. Поверхность / Л. С. Новиков [и др.] // Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 3. С. 1–18.

11. Беспалов В. И. Лекции по радиационной защите : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. С. 40–42.

12. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений : справочник. 2 изд. М. : Атомтдат, 1972. 312 с.

13. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе. М. : Атомиздат, 1979. 304 с.

14. ГОСТ 19170–2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия. Введ. 2001–03–24. / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М. : Изд-во стандартов, 2002. 20 с.

15. Varga L., Horvath E. Evaluation of electronics shielding in micro-satellites. Technical memorandum. DRDC Ottawa TM 2003-017. Defence R&D Canada. Ottawa, 2003. 25 p.

16. Беспалов В. И. Пакет программ EPHCA для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. Приложение. 2000. № 4. С. 159–165.

References

1. Anashin V. S. [Problems of ensuring long active lifetime of REA of communication satellites] *Elektrosvyaz'*. 2009, No. 4, P. 19–22 (In Russ.).

2. Kuznetsov N. V. *Radiatsionnaya opasnost' na okolozemnykh orbitakh i mezhplanetnykh traektoriyakh kosmicheskikh apparatov* [Radiation hazard on the Earth orbits and interplanetary trajectories of spacecrafts] (In Russ.). Available at: http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd/crd3.htm (accessed 29.12.2014).

3. Novikov L. S. *Model' kosmosa. 8 izd. T. 2: Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov.* [Space model. 8th prod. Vol. 2: Impact of the space environment on materials and equipment of spacecrafts] Moscow, Knizhnyy dom Universitet Publ., 2007, 1144 p. (In Russ.).

4. Pavlenko V. I., Edamenko O. D., Yastrebinskiy R. N. [Radiation protective composite material on the basis of a polystyrene matrix] *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova,* 2011, No. 3, P. 113–116 (In Russ.).

5. Pavlenko V. I., Bondarenko G. G., Tarasov D. G., Edamenko O. D. [Modeling of impacts of fast electrons on polymeric radiation protective composites]. *22 mezhdunarodnaya konferentsiya "Radiatsionnaya fizika tverdogo tela" pod red. G. G. Bondarenko* [Proceedings of the 22nd international conference "Radiation Physics of a Solid Body", Ed. by G. G. Bondarenko], Sevastopol', 2012, P. 222–228 (In Russ.).

6. Halbleib J. A., Kensek R. P., Valdez G., Seltzer S. M., Berger M. J. ITS: the integrated TIGER series of electron/photon Monte Carlo transport codes – Version 3.0. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, Vol. 39 (4), P. 1025–1029.

7. Tatsuo Tabata; Vadim Moskvin, Pedro Andreo, Valentin Lazurik,Yuri Rogov. Extrapolated ranges of electrons determined from transmission and projected-range straggling curves. *Radiation Physics and Chemistry,* 2002, No. 64, P. 161–167.

8. Bell J., Martin C., Lail D., Nguyen P. Radiation shielding for a lunar base. *National Aeronautics and Space Adiminstratoin*, 2011.

9. Bezrodnykh I. P., Morozova E. I., Petrukovich A. A. [Brake radiation of electrons in the spacecraft material. Calculation procedure.] *Voprosy elektromekhaniki,* 2011, Vol. 120, P. 37–44 (In Russ.).

10. Novikov L. S., Mileev V. N., Voronina E. N., Galanina L. I., Makletsov A. A., Sinolits V. V. [Radiative effects on materials of space equipment. Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies.] *Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2009, No. 3, P. 1–18 (In Russ.).

11. Bespalov V. I. *Lektsii po radiatsionnoy zashchite : ucheb.posobie*. [Lectures on radiation protection: textbook.] Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta Publ., 2012, P. 40–42 (In Russ.).

12. Kimel' L. R., Mashkovich V. P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy. Spravochnik. Izd. 2.* [Protection against ionizing radiation. Reference book. Edition 2.] Moscow, Atomizdat Publ., 1972, 312 p. (In Russ.).

13. Khaffner Dzh. *Yadernoe izluchenie i zashchita v kosmose.* [Nuclear radiation and protection in space] Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 304 p.

14. *GOST 19170–2001. Steklovolokno. Tkan' konstruktsionnogo naznacheniya. Tekhnicheskie usloviya.* [State Standard 19170–2001. Fiber glass. Fabric for structural purposes. Specifications.] Moscow, Standartinform Publ., 2002, 20 p. (In Russ.).

15. Varga L., Horvath E. Evaluation of electronics shielding in micro-satellites. Technical memorandum: DRDC Ottawa TM 2003-017. Defence R&D Canada. *Ottawa*, 2003, 25 p.

16. Bespalov V. I. [An EPHCA software package for statistical modeling of radiation fields of photons and charged parts.] *Izv. Vuzov. Fizika, Prilozhenie,* 2000, No. 4, P. 159–165 (In Russ.).

© Телегин С. В., Саунин В. Н.,
Драганюк О. Н., Драганюк М. Н., 2015

УДК 537.312:538.911'956

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 975–982

ВЛИЯНИЕ КАТИОННОГО ЗАМЕЩЕНИЯ НА ПОЛИМОРФНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПИРОСТАННАТЕ ВИСМУТА $Bi_2Sn_2O_7$

Л. В. Удод[1, 2*], М. Н. Ситников[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, стр. 38
[*]E-mail: luba@iph.krasn.ru

Рассмотрена разработка технологии новых сенсорных материалов, необходимых для газочувствительных приборов, применяемых в ракетостроении. Целью данной работы является изучение влияния допирования разновалентными катионами на кристаллографическую структуру, диэлектрические и электрические свойства пирохлорного соединения $Bi_2Sn_2O_7$, обладающего селективной избирательностью к газам.

Методом твердофазного синтеза впервые синтезированы соединения $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, находящиеся сразу в двух полиморфных модификациях – орторомбической и кубической. В твердых растворах $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ методом сканирующей калориметрии обнаружено два новых структурных перехода, по сравнению со станнатом висмута $Bi_2Sn_2O_7$. Ионы Mn^{4+} сместили фазовые границы полиморфных переходов в сторону меньших температур, а фазовый α→β-переход около 370 К, характерный для $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, где x = 0, 0,05, подавили почти полностью. Полиморфный переход при T = 543 К для $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ протекает с выделением тепла, в отличие от $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, где x = 0, 0,05.

Исследована взаимосвязь структурных, электрических и диэлектрических свойств. Установлены аномалии в температурной зависимости электросопротивления и диэлектрической проницаемости (мнимой и реальной частями) как в области низких температур, так и при высоких температурах. Эти особенности объясняются в рамках модели мартенситных фазовых переходов. Методом сканирующей калориметрии найдены температуры структурных фазовых переходов, которые коррелируют с аномалиями электросопротивления в интервале температур 300 < T < 1000 К для $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, x = 0, 0,05.

Ключевые слова: полиморфные переходы, диэлектрическая проницаемость, электросопротивление, катионное замещение, дифференциальная сканирующая калориметрия.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 975–982

THE EFFECT OF CATION SUBSTITUTION ON POLYMORPHIC TRANSITIONS IN BISMUTH PYROSTANNATE $Bi_2Sn_2O_7$

L. V. Udod[1,2*], M. N. Sitnikov[1]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Kirensky Institute of Physics, SB RAS
50–38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: luba@iph.krasn.ru

The goal of this work is to develop a new technology of sensor materials required for gas sensing devices used in missile. The aim of this work is to study the effect of doping cations with different valency on the crystallographic structure, dielectric and electrical properties of pyrochlore compound $Bi_2Sn_2O_7$ with selectivity to gases. Polycrystalline compounds $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, where Me = Mn, Cr, x = 0, 0.05 have been synthesized by conventional solid-state reaction. According to the X-ray powder diffraction research, our sample consists of two polymorphs phases: cubic and rhombic. Two new structural transition are found in Bi2 $(Sn_{0.95}Cr_{0.05})_2O_7$ solid solutions by scanning calorimetry, as compared to bismuth pyrostannate $Bi_2Sn_2O_7$. Ions Mn^{4+} leads to shift of phase boundary of polymorphic transitions towards lower temperatures, and the phase α→β-transition at about 370 K, which is characteristic for Bi2(Sn1-xCrx)2O7, where x = 0, 0.05 is suppressed. The polymorphic transition at T = 543 K for $Bi_2(Sn_{0.95}Mn_{0.05})_2O_7$ occurs with calorification, in contrast to $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, where x = 0, 0.05.

The relationship between structural, electrical and dielectric properties is investigated. Anomalies in the temperature dependence of electrical resistivity and dielectric permeability (real and imaginary part) as in the low region temperatures as in the high region temperature are found. These features are explained within a model of martensitic

phase transitions. The temperature of the structural phase transitions correlates with temperature of maximum of the electrical resistivity in the temperature range 300 < T < 1000 K for $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, x = 0, 0.05 was found by scanning calorimetry method.

Keywords: polymorphic transitions, dielectric permeability, cation substitution, electrical resistivity, differential scanning calorimetry.

Введение. Создание новых материалов с максимально высокой электронной проводимостью является важнейшей проблемой современного материаловедения в связи с разработкой новых источников энергии, преобразующих химическую энергию в электрическую. Такие материалы могут быть использованы для разнообразных электрохимических приложений, включающих мембраны для выделения кислорода, газовые сенсоры. Для этих целей применяют не только простые оксиды металлов, главным образом, переменной валентности, но и их соединения, например $CaZrO_3$, $SrCeO_3$, $BiFeO_3$, $Bi_2Sn_2O_7$, $BaTiO_3$, $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$. Одним из направлений применения сенсорных материалов является ракето- и самолетостроение. Так, указанные вещества служат для изготовления сенсоров, устойчивых к радиации, для анализа внешней и внутренней среды космического аппарата, определения физико-химических характеристик планет и их спутников, определения состояния среды технических и жилых модулей космических аппаратов. Для жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов из указанных материалов могут изготавливаться газовые фильтры. Особо перспективными являются полупроводниковые газоаналитические приборы, позволяющие сочетать высокую газовую чувствительность с исключительно малыми габаритами и энергопотреблением.

В связи с этим для дальнейшего прогресса в этой области науки и техники требуется расширить круг материалов, обладающих сенсорными свойствами, и по-новому подойти к решению проблем химических сенсоров на основе оксидов металлов. Одним из подходящих для этих целей является пиростаннат висмута $Bi_2Sn_2O_7$, имеющий ценное практическое применение в газовых сенсорах как датчик на определение угарного газа, аммиака, сероводорода в присутствии других газов [1], поэтому на сегодняшний день изучение его свойств является актуальной задачей. Чувствительные элементы датчиков и мультисенсоров на основе системы Bi_2O_3–SnO_2 [2; 3] работают при температурах нагревателя 100–400 °С.

Пиростаннат висмута $Bi_2Sn_2O_7$ относится к семейству пирохлоров с общей химической формулой $A_2B_2X_7$. В большинстве случаев [4] кристаллическая структура этих соединений относится к кубической с постоянной решетки около 1,0 нм с восемью формульными единицами в элементарной ячейке [5; 6]. Большой А-ион расположен в 16*d*-позициях и восьмикратно координирован ионами кислорода, в то время как меньший В-ион находится в октаэдрическом окружении кислорода (16*c*-позиции) и имеет шестикратную координацию. В соединениях $A_2Sn_2O_7$ все связи Sn–O эквивалентны, образуют подрешетку Sn_2O_6 из SnO_6-октаэдров, соединенных кислородным мостиком Sn–O–Sn под углом 135° в зигзагообразные цепи [7]. Катион A_2 образует подрешетку A_2O' из цепочек A-O'. Катионы A и B в структуре пирохлоров образуют подрешетку связанных тетраэдров.

Пиростаннат висмута $Bi_2Sn_2O_7$ существует в трех кристаллографических фазах: тетрагональной α-$Bi_2Sn_2O_7$ – a = 21,328 Å, c = 21,545 Å, существующей до 90 ºС; кубической β-$Bi_2Sn_2O_7$ – a = 21,4 Å, существующей между 90 и 680 ºС и кубической гранецентрированной γ-$Bi_2Sn_2O_7$ – a = 10,73 Å, существующей выше 680 ºС [5; 8]. Возможно также одновременное существование двух полиморфных модификаций в $Bi_2Sn_2O_7$ – орторомбической и кубической [9].

Полупроводниковый характер объемной проводимости оксидов металлов в значительной степени определяется дефектностью кристаллической решетки, которую можно целенаправленно изменять, проводя замещения в катионной подрешетке. Это один из доступных методов управляемого влияния на физические свойства базисного соединения, например, влияние легирования 3-*d*-элементами на магнитные свойства оксидных соединений [10; 11]. В работах [12; 13] показано влияние замещения ионов Sn на ионы 3-*d*-элементов, Mn и Cr на магнитные свойства.

Парамагнитная температура Кюри, описываемая законом Кюри–Вейсса, для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ [12] определена для участка температур $0 < T < 40$ К и равна $\theta \approx 2$ К. Магнитная восприимчивость при температуре 165 К меняет знак с положительного на отрицательный, и при комнатной температуре соединение $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ является диамагнетиком, что объясняется делокализацией электронов на наномасштабах в окрестности ионов хрома, аналог химического фазового расслоения. Полевая зависимость магнитного момента при T = 4,2 К имеет нелинейный характер, и лучшее согласие с экспериментальными данными M(H) при описании функцией Бриллюэна $M/N_A\mu_B = SB_S(gS\mu_B H/k_BT)$ достигается для спина иона хрома, S = 3/2, N_A – число Авогадро, g = 2 – g-фактор, S = 3/2 – спин, k_B – постоянная Больцмана. Магнитные измерения подтверждают трехвалентный характер ионов хрома.

Наличие ионов хрома в трехвалентном состоянии наблюдалось в кристаллах $LiNdO_3$ [14]. При вхождении в ниобиевый октаэдр ион Cr^{+3} вызывает деформацию этого октаэдра, которая может происходить двумя путями [15]: как с изменением положения кислородных ионов возле неподвижного Cr^{+3}, так и в результате смещения Cr^{+3} из положения Nb^{+5} к центру октаэдра. В работе [14] экспериментальными и теоретическими данными подтверждена деформация ниобиевого октаэдра при вхождении в него трехвалентного иона хрома. Чтобы соблюдалась зарядовая нейтральность в $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, замещение ионов Sn^{4+} на Cr^{3+}, возможно, происходит по следующей схеме: $3Sn^{4+} \rightarrow 4Cr^{3+}$, подобная схема реализуется

в соединениях системы Bi_2O_3–ZnO–SnO_2–Nb_2O_5 [16]. В этой работе показано, что Sn^{4+}, Zn^{2+}, Nb^{5+} занимают B-позиции, и зарядовая нейтральность осуществляется следующим образом: $3Sn^{4+} \rightarrow Zn^{2+} + 2Nb^{5+}$.

Температурная зависимость магнитной восприимчивости $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ [13] имеет аномалию при температуре T = 155 К. Температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости описывается законом Кюри–Вейсса в интервале $0 < T < 150$ К, и парамагнитная температура Кюри на этом участке имеет слабо отрицательное значение $\theta = -0,7$ К. Кривая полевой зависимости магнитного момента при температуре T = 4,2 К, также как и для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, имеет нелинейный характер. Характер поведения экспериментальной кривой имеет тенденцию к насыщению, что согласуется с теоретическими расчетами с использованием функции Бриллюэна $M/N_A\ \mu_B = CgSB_S(gS\mu_B\ H/k_BT)$ для иона Mn^{+4} со спином S = 3/2.

В данной работе для решения проблемы увеличения чувствительности, селективности, стабильности химических сенсоров нами синтезирован ряд соединений на основе пиростанната висмута $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, изучены структурные, диэлектрические и электрические свойства.

Синтез и дифференциальная сканирующая калориметрия. Синтез соединений $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, осуществлялся методом твердофазной реакции по следующей схеме:

$$2\ SnO_2 + Bi_2O_3 \rightarrow Bi_2Sn_2O_7$$

и подробно описан в [9; 12; 13]. Согласно рентгеноструктурному анализу при комнатной температуре образцы соответствуют химической формуле $Bi_2Sn_2O_7$ и находятся в двух полиморфных модификациях, кубической и орторомбической, сосуществующих одновременно, причем кубическая фаза по процентному соотношению превосходит орторомбическую.

Структурные переходы, протекающие в соединениях, сопровождаются выделением или поглощением тепла, и определить их можно, используя метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Комплексный термический анализ образцов $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, проведен на установке STA 449 C Jupiter (фирмы NETZSCH), совмещенной с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 C Aeolos (фирмы NETZSCH) для анализа газов, выделяющихся при нагревании образцов. Данная методика сочетает одновременное фиксирование изменения массы (термогравиметрия, TG) и тепловых потоков (дифференциальная сканирующая калориметрия, DSC). Исследования выполнялись в платинородиевых тиглях с крышками, имеющими отверстия, в температурном интервале 310–1073 К – в режиме нагревания и 1073–523 К – охлаждение в динамической атмосфере аргона со скоростью потока 40 ml/min. Скорость нагревания и охлаждения составляла 10 grad/min. Кривые DSC (рис. 1) для $Bi_2Sn_2O_7$ (рис. 1, *а*, кривая 1) и $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ (рис. 1, *б*, кривая 1) имеют несколько эндотермических пиков при нагревании образцов.

Проведенный масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся при нагревании $Bi_2Sn_2O_7$ и $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, показал, что при сканировании по массовым числам кислородсодержащих ионов (16–18, 32) изменения интенсивности сигналов не обнаружено. На кривой DSC нагревания $Bi_2Sn_2O_7$ (кривая 1, рис. 1, *а*) наблюдаются три эндотермических эффекта при температурах 370, 548, 872 К. При последующем охлаждении $Bi_2Sn_2O_7$ (кривая 2, рис. 1, *а*) на кривой DSC присутствует только один пик при температуре 865,4 К. Наличие пиков на кривой DSC свидетельствует о прохождении фазовых переходов. Известно, что станнат висмута $Bi_2Sn_2O_7$ претерпевает ряд полиморфных переходов: α-$Bi_2Sn_2O_7$ – термодинамически стабильная фаза при комнатной температуре, в диапазоне 130–630 °С существует β-$Bi_2Sn_2O_7$, а выше 630 °С преобладает кубическая гранецентрированная γ-$Bi_2Sn_2O_7$ фаза. Наш образец, согласно данным рентгеноструктурного анализа, при комнатной температуре [9] уже находится в двух кристаллографических полиморфных модификациях – кубической и орторомбической, поэтому фазовый α→β-переход около 370 К растянут по температуре. Следующий эффект, протекающий с поглощением теплоты при 548 К, говорит еще об одном фазовом переходе, при котором орторомбическая фаза полностью переходит в кубическую. В окрестности этой температуры обнаружены аномалии в температурных зависимостях мнимой части диэлектрической проницаемости и электросопротивления $Bi_2Sn_2O_7$ [9]. Третий четко выраженный эндотермический пик при T = 872 К является обратимым, на кривой DSC охлаждения (кривая 2, рис. 1, *а*) имеется соответствующий экзотермический пик при T = 865 К. Теплота, выделяемая при этом, Q = 0,48 J/g, близка по своему значению теплоте, поглощаемой при нагревании, Q = –0,54 J/g. Близость значений температур и теплот превращения третьего эффекта позволяет интерпретировать его как обратимый фазовый переход, при котором существует кубическая фаза $Bi_2Sn_2O_7$.

Результаты исследования DSC нагревания образца $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ представлены на рис. 1, *б*, кривая 1, где имеются несколько эндотермических максимумов при температурах 367, 473, 553, 646 К, коррелирующих с аномалиями температурной зависимости удельного электросопротивления. Соответствие температур пиков T = 367, 553 К для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ и T = 370, 548 К для $Bi_2Sn_2O_7$ говорит об их одинаковой природе, фазовом структурном переходе в α→β-фазу и из орторомбической фазы в кубическую. Наличие еще двух эндотермических пиков, возможно, связано с образованием локальных деформаций орторомбической и кубической структур, которые не коррелированы между собой и не обнаруживаются в рентгеноструктурном анализе, но в транспортных свойствах они могут проявиться. Обратный ход кривой DSC, охлаждение, выявили плохо выраженные экзоэффекты при температурах 924 и 977 К.

Кривая DSC нагревания $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ (рис. 1, кривая 2), имеет отличия от экспериментальных результатов для $Bi_2Sn_2O_7$ и $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$. Влияние ионов марганца проявилось в смещении границ

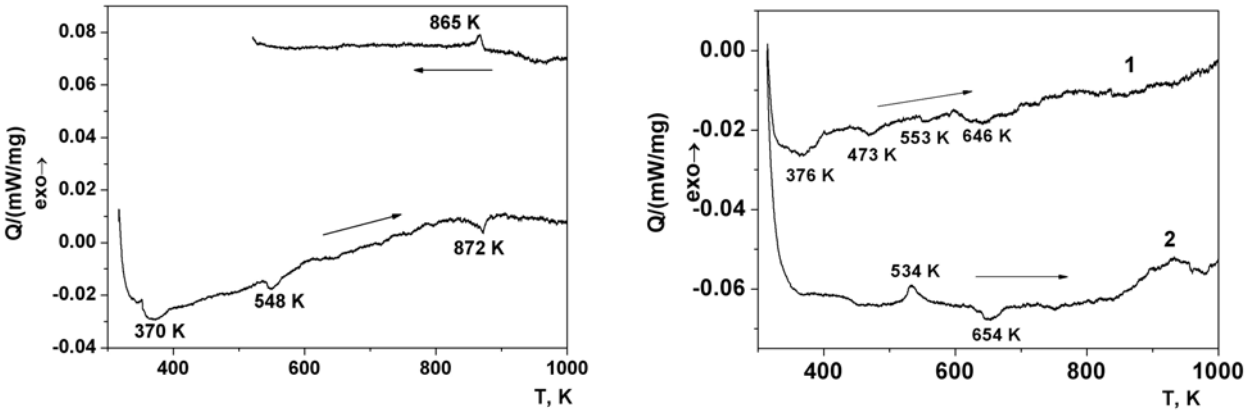
полиморфных переходов, что выразилось в отсутствии эндотермического пика при T = 367–370 К, наблюдаемых в $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_{0,05})_2O_7$, x = 0, 0,05. В области температур 548 К для $Bi_2Sn_2O_7$ и 553 К для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ наблюдается эндотермический тепловой эффект, а для $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ – экзотермический. Близость температур и характер этих эффектов говорит об их одинаковой природе и соответствует структурному переходу из орторомбической фазы в кубическую.

Для $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_{0,05})_2O_7$, x = 0, 0,05, полиморфное превращение из орторомбической в кубическую фазу сопровождается поглощением тепла и описывается эндотермическим эффектом при температуре T = 534 К. При легировании станната висмута марганцем образующийся твердый раствор $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$, вероятно, находится в метастабильном состоянии и содержит избыточную энергию, которая выделяется при переходе в равновесную кубическую фазу. Поэтому в данном случае мы наблюдаем экзотермический эффект при температуре T = 534 К для полиморфного превращения орторомбической фазы в кубическую.

Диэлектрические свойства. Исследования диэлектрической проницаемости были выполнены на установке LCR-829 METER в температурном интервале 100–500 К на частоте 100 kHz.

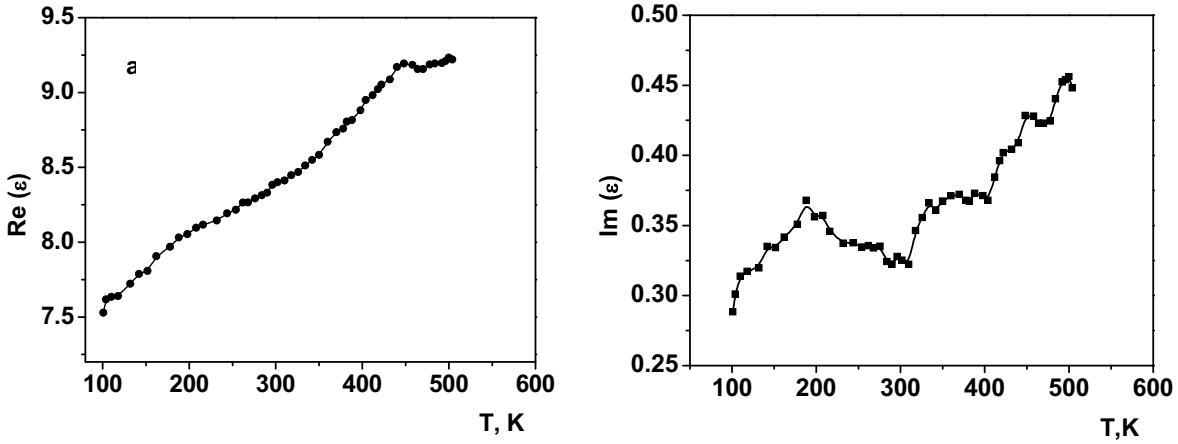
Для образца $Bi_2Sn_2O_7$ характерен рост диэлектрической проницаемости с ростом температуры (рис. 2). На температурной зависимости реальной части диэлектрической восприимчивости Re(ε), изображенной на рис. 2, *а*, наблюдается максимум в окрестности температуры 450 К и изменение угла наклона Re(ε) (T) при 200 К. Температурная зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости Im (ε) (рис. 2, *б*) имеет несколько изломов, хорошо проявляются максимумы при температурах около 200, 340 и 450 К.

Температурная аномалия диэлектрической проницаемости в районе 340 К коррелирует с началом экзотермического эффекта на кривой DSC (рис. 1, *а*), соответствующей α→β-переходу.



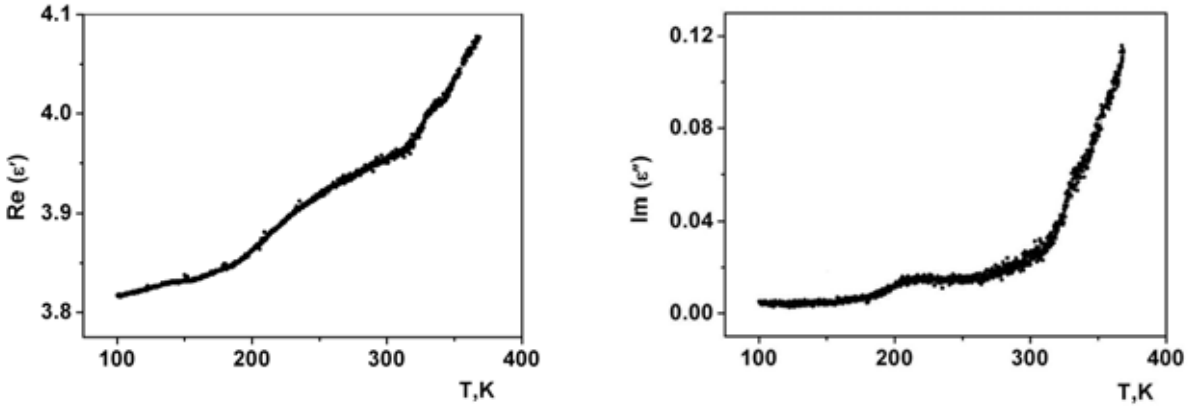
а *б*

Рис. 1. Дифференциальная сканирующая калориметрия:
а – кривые DSC для $Bi_2Sn_2O_7$; *б* – кривая 1 – DSC для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, кривая 2 – DSC для $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$



а *б*

Рис. 2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $Bi_2Sn_2O_7$ на частоте ω = 100 kHz:
а – реальная часть; *б* – мнимая часть



а *б*

Рис. 3. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ на частоте ω = 100 kHz: *а* – реальная часть; *б* – мнимая часть

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_{0,05})_2O_7$ имеет нелинейный характер, с ростом температуры наблюдается рост диэлектрической проницаемости (рис. 3). Реальная часть (рис. 3, *а*) диэлектрической проницаемости имеет аномалию в интервале температур 200–300 К и резкий подъем от T = 310 К. Мнимая часть (рис. 3, *б*) диэлектрической проницаемости имеет точку перегиба при T = 205 К и резкий рост от T = 313 К. При температуре T = 330–340 К как для реальной, так и для мнимой частей температурной зависимости диэлектрической проницаемости зафиксирована ступенька, для мнимой части она слабо выражена, что соответствует началу экзотермического эффекта на кривой DSC (рис. 1, *б*, кривая 1).

Диэлектрическая проницаемость $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ монотонно растет с увеличением температуры. Температурные зависимости реальной Re(ε) и мнимой Im (ε) частей диэлектрической проницаемости имеют небольшой максимум около T = 350 К.

Электрические свойства. Для исследования фазовых границ полиморфных переходов в $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, была выбрана методика измерения температурной зависимости электросопротивления. Данная методика наглядно отражает происходящие в материале фазовые превращения. Измерение электрических свойств выполнены четырехзондовым методом на установке Multimeter 344 10A Agllent Technologies в температурной области 300–900 К.

На кривой температурной зависимости удельного электросопротивления $Bi_2Sn_2O_7$ (рис. 4) наблюдается резкое падение от ρ ~ 10^8 Ohm·cm до ρ ~ 10^5 Ohm·cm в интервале температур 200–330 К, причем при 245–290 К имеются аномалии. В интервале температур 330–600 К имеется широкий максимум около 450 К [17]. Минимум электросопротивления, T = 330 К, коррелирует с тепловым экзотермическим эффектом DSC в районе температуры 370 К (рис. 1, *а*), соответствующим α→β-переходу.

Величина энергии активации ΔE_1 = 0,23 eV рассчитана из температурной зависимости $\lg(\rho/10^3T)$, описываемой линейной функцией $\lg\rho = \lg\rho_{01} + (\Delta E_1/k_BT)$, где k_B – постоянная Больцмана. Уменьшение величины энергии активации, по сравнению с теоретическими данными [8], обусловлено примесным типом проводимости.

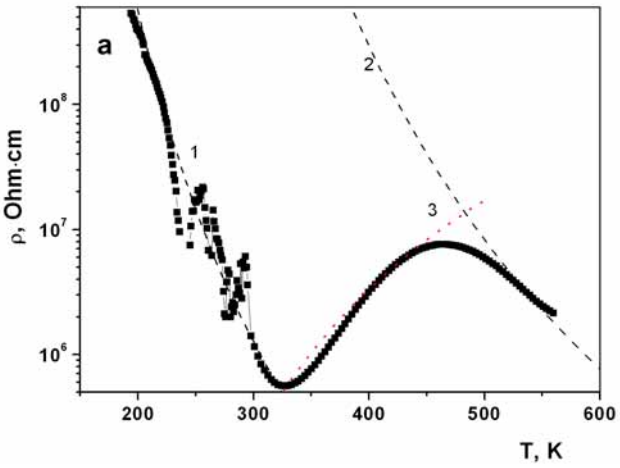


Рис. 4. Температурная зависимость удельного электросопротивления $Bi_2Sn_2O_7$: 1 – $\rho = \rho_{01}\exp(\Delta E_1/k_BT)$, 2 – $\rho = \rho_{02}\exp(\Delta E_2/k_BT)$, 3 – $\rho = \rho_0\exp(\Delta E/k_BT)$ с $\rho_0 = 5\cdot10^5$, ΔE = 0,28 eV, ρ_{01} = 6,2 Ohm·cm, ΔE_1 = = 0,23 eV, ρ_{02} = 5,2 Ohm·cm, ΔE_2 = 0,51 eV

Отклонение сопротивления от экспоненциальной зависимости подобно поведению электросопротивления в сплавах Гейслера системы Ni_2MnX (X = Ga, Sn, In, Co) [18; 19] и связывается с тем, что на участке температур 200–450 К в $Bi_2Sn_2O_7$ происходит мартенситный переход из орторомбической фазы в кубическую. Наличие резких аномалий на этом участке говорит о том, что в структуре имеются домены в виде зерен с различной ориентацией в образце. Такая схема характерна для мартенситных переходов как металлов, так и полупроводников. Например, поликристаллический $La_{0,275}Pr_{0,35}Ca_{0,375}MnO_3$ [20] при температуре 300 К имеет кубическую кристаллическую решетку,

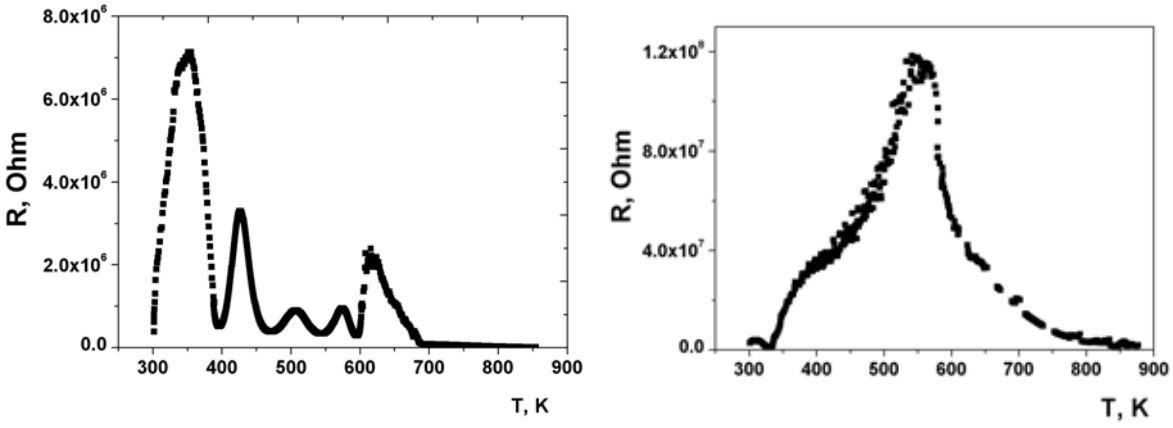
а при $T \sim 210$ К происходит образование зародышей и рост линзообразных и пластинчатых доменов в каждом зерне. С дальнейшим охлаждением увеличивается различие форм доменов, что является результатом структурных деформаций. В этой работе установлена зависимость транспортных свойств от размера зерна из температурной зависимости удельного сопротивления.

Энергия активации станната висмута в кубической фазе составляет $\Delta E_2 = 0{,}51$ eV при $T > 450$ К и увеличивается в 1,8 раза по сравнению с орторомбической структурой. Рост сопротивления в интервале температур 320 К $< T <$ 450 К объясняется в модели сосуществованием двух фаз, когда протекание по орторомбической фазе исчезает, а в кубической фазе существуют островки мартенситной (низкотемпературной) фазы. Область этих островков уменьшается с ростом температуры, а ширина потенциального барьера, образованного кубической фазой с большим сопротивлением, увеличивается. Это можно представить в виде модели потенциальных ям с уменьшающимся линейным размером и числом электронов в яме. Потенциальный барьер с ростом температуры увеличивается и предположительно будет меняться по линейному закону $\Delta E = (\Delta E_2 - \Delta E_1)(T/T^* - 1)$. Подвижность носителей заряда, связанная с перескоком электронов по островкам, будет определяться туннелированием электронов $\mu \sim \exp(-\Delta E/kT)$. Сопротивление будет увеличиваться с ростом температуры, как изображено на рис. 4 пунктирной линией, до температуры $T = 450$ К, когда подвижность носителей в матрице сравняется с подвижностью туннелирующих электронов. На этом же рисунке представлены результаты расчета сопротивления с подгоночными параметрами $\rho = \rho_0 \exp(\Delta E/k_B T)$ с $\rho_0 = 5\cdot10^5$, $\Delta E = 3280$ К, $T^* = 325$ К. Модель удовлетворительно объясняет экспериментальные данные и согласуется с результатами структурных исследований [21], согласно которым станнат висмута $Bi_2Sn_2O_7$ находится в однофазном состоянии с кубической β-фазой в области высоких температур.

На рис. 5, *а* приведена температурная зависимость электросопротивления $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, где наблюдаются максимумы электросопротивления в окрестности структурных переходов, наибольший максимум $R \sim 10^6$ Ohm при $T = 350$ К соответствует α→β структурному переходу. Переходы, наблюдаемые на кривых DSC (рис. 1, *б*, кривая 1), при T = 473, 553 К совпадают с температурами минимумов на кривой температурной зависимости электросопротивления. Симметрия кристаллической структуры определяет электронную структуру полупроводника, ширину запрещенной зоны и положение примесных уровней в ней. При наличии нескольких фаз электронная плотность состояний имеет максимумы и минимумы. Изменение кристаллической структуры индуцирует сдвиг края подвижности, меняется плотность состояний носителей заряда, подвижность и величина электросопротивления в несколько раз.

Электроны Bi 6*s*-оболочки и O 2*p*-оболочки в кубической структуре станната висмута $Bi_2Sn_2O_7$ находятся в большей части в верхней валентной зоне, в то время как электроны Sn 5*s*-оболочки, O 2*p*-оболочки и Bi 6*p*-оболочки занимают дно зоны проводимости. Различные вклады электронов Sn 5*s*- и Bi 6*s*-состояний валентной зоны и зоны проводимости проявляются как в атомной энергии связи, так и в силе взаимодействия катионов металла с анионами кислорода. [22]. Ионы хрома преимущественно занимают октаэдрические позиции [23–25], поэтому можно предположить, что в нашем образце Cr^{+3} замещает ионы олова. Этому способствует конфигурация пирохлор-решетки. В результате вблизи дна зоны проводимости возможно образование примесной подзоны из ионов хрома.

Кривая температурной зависимости электросопротивления $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ (рис. 5, *б*) растет до $R \sim 10^8$ Ohm с последующим снижением при $T \approx 550$ К. На кривой DSC имеется экзотермический пик в районе этой температуры, который говорит о перестройке в кристаллографической решетке и переходе в устойчивое кубическое состояние. Отсутствие аномалий на кривых электросопротивления и DSC при $T = 370$ К, в отличие от экспериментальных данных для $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$, свидетельствует о влиянии ионов Mn^{4+} на структурные переходы, характерные для $Bi_2Sn_2O_7$. Величина энергии активации $\Delta E = 0{,}7$ eV в интервале температур 620–880 К.



а *б*

Рис. 5. Температурные зависимости электросопротивления:
а – $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$; *б* – $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$

Заключение. В соединениях $Bi_2(Sn_{1-x}Me_x)_2O_7$, где Me = Mn, Cr, x = 0, 0,05, обнаружено наличие одновременного двухфазного состояния с орторомбической и кубической структурой при комнатной температуре. Полиморфные переходы и переход из орторомбической в кубическую фазу сопровождаются максимумами в температурном поведении электросопротивления, вызванными перестройкой электронной структуры. Установлена взаимосвязь между видом замещающего иона и его структурными, диэлектрическими и электрическими свойствами. В твердых растворах $Bi_2(Sn_{0,95}Cr_{0,05})_2O_7$ методом сканирующей калориметрии обнаружено два новых структурных перехода, по сравнению со станнатом висмута $Bi_2Sn_2O_7$. Ионы Mn^{4+} сместили фазовые границы полиморфных переходов в сторону меньших температур, а фазовый α→β-переход около 370 К, характерный для $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, где x = 0, 0,05, подавили почти полностью. Полиморфный переход при T = 543 К для $Bi_2(Sn_{0,95}Mn_{0,05})_2O_7$ протекает с выделением тепла, в отличие от $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$, где x = 0, 0,05.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-42-04099 р_сибирь_а, и государственного задания № 114090470016.

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research projects no. 15-42-04099 r_siberia_a and government work no. 114090470016.

Библиографические ссылки

1. Sarala Devi G., Manoraoma S. V., Rao V. J. SnO_2: Bi_2O_3 based CO sensors: Laser-Raman, temperature programmed desoption and X-ray photoelectron spectroscopic studies // Sensors and Actuators B. 1999. Vol. 56. P. 98–105.

2. Semiconductor Sensors in Physico-Chemical Studies / L. Yu. Kupriyanov (ed.). Handbook of Sensors and Actuators Series. M., 1999. 234 p.

3. Chemical Sensors Technology / T. Selyama (ed.). Amsterdam : Kodansha Elsevier, Publ., 1998. 459 p.

4. Ling H. C., Yan M. F., Rhodes W. W. High dielectric constant and smoll temperature coefficient bismuth-based dielectric compositions // J. Mater. Res. 1990. Vol. 5(8). P. 1752–1762.

5. Brisse F., Knor O. Pyrochlores. III. X-Ray, neutron, infrared, and dielectric studies of $A_2Sn_2O_7$ stannates // Can. J. Chem. 1968. Vol. 46. P. 859–873.

6. Minervini L., Grimes R. W., Sickafus K. E. Disorder in Pyrochlore Oxides // J. Am. Ceram. Soc. 2000. Vol. 83(8). P. 1873–1878.

7. Brown S., Gupta H. C. Lattice dynamic study of optical modes in $Tl_2Mn_2O_7$ and $In_2Mn_2O_7$ pyrochlores // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. P. 054434-6.

8. Walsh A. and Watson. W. G. Polymorphism in Bismuth Stannate: A First-Principles Study // Chem. Mater. 2007. Vol. 19. P. 5158–5164.

9. Диэлектрические и электрические свойства полиморфного пиростанната висмута $Bi_2Sn_2O_7$ / Л. В. Удод [и др.] // ФТТ. 2014. Т. 56. С. 1267–1271.

10. Effect of Ni-substitution on magnetic phase transition in CuB_2O_4 / G. A. Petrakovskii [et al.] // JMMM. 2006. Vol. 300. P. e476–e478.

11. Effect of Substitution on the Magnetic Properties of CuB_2O_4 / G. A. Petrakovskii [et al.] // The Physics of Metals and Metallography. 2005. Vol. 99(1). P. S53–S56.

12. Корреляция магнитных и транспортных свойств с полиморфными переходами в пиростаннате висмута $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$ / С. С. Аплеснин [и др.] // ФТТ. 2015. Т. 57. С. 1590–1595.

13. Effect of Mn Doping on Magnetic and Dielectric Properties of $Bi_2Sn_2O_7$ / L. V. Udod [et al.] // Solid State Phenomena. 2015. Vol. 233–234. P. 105–108.

14. Тумаев Е. Н., Авадов К. С. Оптические свойства ионов трехвалентного хрома в кристалле $LiNbO_3$ // ФТТ. 2011. Т. 53. С. 518–523.

15. Yang Z. Y., Rudowicz C., Qin J. The effect of disorder in the local lattice distortions on the EPR and optical spectroscopy parameters for a new Cr^{3+} defect center in Cr^{3+}: Mg^{2+}: $LiNbO_3$ // Physica B. 2002. Vol. 318(2–3). P. 188–197.

16. Huiling Du, Xi Yao, Liangying Zhang. Structure, IR spectra and dielectric properties of Bi_2O_3–ZnO–SnO_2–Nb_2O_5 quarternary pyrochlore // Ceramics International. 2002. Vol. 28. P. 231–234.

17. Electrical and Dielectrical Propeties of Gas-Sensor Resistive Type $Bi_2Sn_2O_7$ / L. V. Udod [et al.] // Solid State Phenomena. 2014. Vol. 215. P. 503–506.

18. Large magnetoresistance in single-crystalline $Ni_{50}Mn_{50-x}In_x$ alloys (x = 14–16) upon martensitic transformation / S. Y. Yu [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 162503-3.

19. Large magnetoresistance in $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ alloy / V. R. Sharma [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 222509-3.

20. Martensitic accommodation strain and the metal-insulator transition in manganites / V. Podzorov [et al.] // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. P. 140406(R).

21. Shannon R. D., Beirlein J. D., Gillon J. L. Polymorphism in $Bi_2Sn_2O_7$ // J. Phys. Chem. Solids. 1980. Vol. 41. P. 117–122.

22. Walsh Aron, Graeme W. Watson, David J. Payne. A theoretical and experimental study of the distorted pyrochlore $Bi_2Sn_2O_7$ // J. Mater. Chem. 2006. Vol. 16. P. 3452–3458.

23. Jenlrzejewska I., Mroziski J., Zajdel P. X-Ray and magnetic investigations of the polycrystalline compounds with general formula $Zn_xSn_yCr_zSe_4$ // Archives of Metallurgy and Materials. 2009. Vol. 54. P. 723–730.

24. Weiss A., Witte H. Kristallstrukture und chemische Bindung. Weinheim : Verlag Chemie, 1983.

25. Pandit A. A., More S. S., Dorik R. G. Structural and magnetic properties of $Co_{1+y}Sn_yFe_{2-2y-x}Cr_xO_4$ ferrite system // Bull. Mater. Sci., 2003. Vol. 26. P. 517–521.

References

1. Sarala Devi G., Manoraoma S. V., Rao V. J. SnO_2: Bi_2O_3 based CO sensors: Laser-Raman, temperature programmed desoption and X-ray photoelectron spectroscopic studies. *Sensors and Actuators B*. 1999, Vol. 56, P. 98–105.

2. Kupriyanov L. Yu. (Ed.). *Semiconductor Sensors in Physico-Chemical Studies* Handbook of Sensors and Actuators Series, Moscow, 1999, 234 p.

3. Selyama T. (Ed.). *Chemical Sensors Technology.* Amsterdam: Kodansha Elsevier, Publ., 1998, 459 p.

4. Ling H. C., Yan M. F., Rhodes W. W. High dielectric constant and smoll temperature coefficient bismuth-based dielectric compositions. *J. Mater. Res*. 1990, Vol. 5(8), P. 1752–1762.

5. Brisse F., Knor O. Pyrochlores. III. X-Ray, neutron, infrared, and dielectric studies of $A_2Sn_2O_7$ stannates. *Can. J. Chem*. 1968, Vol. 46, P. 859–873.

6. Minervini L., Grimes R. W., Sickafus K. E. Disorder in Pyrochlore Oxides. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000, Vol. 83(8), P. 1873–1878.

7. Brown S., Gupta H. C. Lattice dynamic study of optical modes in $Tl_2Mn_2O_7$ and $In_2Mn_2O_7$ pyrochlores. *Phys. Rev. B* 2004, Vol. 69, P. 054434-6.

8. Walsh A. and Watson. W. G. Polymorphism in Bismuth Stannate: A First-Principles Study. *Chem. Mater*. 2007, Vol. 19. P. 5158–5164.

9. Udod L. V., Aplesnin S. S., Sitnikov M. N., Molokeev M. S. Dielectric and Electrical Properties of Polymorphic Bismuth Pyrostanate $Bi_2Sn_2O_7$. *Physics of the Solid State*. 2014, Vol. 56, P. 1315–1319.

10. Petrakovskii G. A., Sablina K. A., Udod L. V. Pankrats A. I., Velikanov D. A., Szymczak R., Baran M., Bondarenko G. V. Effect of Ni-substitution on magnetic phase transition in CuB_2O_4. *JMMM.* 2006, Vol. 300, P. e476–e478.

11. Petrakovskii G. A., Sablina K. A., Udod L. V. et al. Effect of Substitution on the Magnetic Properties of CuB_2O_4. *The Physics of Metals and Metallography.* 2005, Vol. 99(1), P. S53–S56.

12. Aplesnin S. S., Udod L. V., Sitnikov M. N. et al. [Correlation of magnetic and transport properties with polymorphic transitions in pirostannate bismuth $Bi_2(Sn_{1-x}Cr_x)_2O_7$]. *Fizika Tverdogo Tela*. 2015, Vol. 57, P. 1590–1595 (In Russ.).

13. Udod L. V., Aplesnin S. S., Eremin E. V., Sitnikov M. N., Molokeev M. S. Effect of Mn Doping on Magnetic and Dielectric Properties of $Bi_2Sn_2O_7$. *Solid State Phenomena*. 2015, Vol. 233-234, P. 105–108.

14. Tumaev E. N., Avadov K. S. [Optical properties of trivalent chrome ions in crystal $LiNbO_3$]. *Fizika Tverdogo Tela*. 2011, Vol. 53, P. 518–523 (In Russ.).

15. Yang Z. Y., Rudowicz C., Qin J. The effect of disorder in the local lattice distortions on the EPR and optical spectroscopy parameters for a new Cr^{3+} defect center in Cr^{3+}: Mg^{2+}: $LiNbO_3$. *Physica B.* 2002, Vol. 318(2–3), P. 188–197.

16. Huiling Du, Xi Yao, Liangying Zhang. Structure, IR spectra and dielectric properties of Bi_2O_3–ZnO–SnO_2–Nb_2O_5 quarternary pyrochlore. *Ceramics International.* 2002, Vol. 28, P. 231–234.

17. Udod L. V., Sitnikov M. N., Aplesnin S. S., Molokeev M. S. Electrical and Dielectrical Propeties of Gas-Sensor Resistive Type $Bi_2Sn_2O_7$. *Solid State Phenomena*. 2014, Vol. 215, P. 503–506.

18. Yu S. Y., Liu Z. H., Liu G. D., Chen J. L., Cao Z. X., Wu G. H., Zhang B., Zhang X. X. Large magnetoresistance in single-crystalline $Ni_{50}Mn_{50-x}In_x$ alloys (x = 14–16) upon martensitic transformation. *Appl. Phys. Lett.* 2006, Vol. 89, P.162503-3.

19. Sharma V. R., Chattopadhyay M. R., Shaeb R. Y. B., Chouhan A., Roy S. B. Large magnetoresistance in $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ alloy. *Appl. Phys. Lett*. 2006, Vol. 89, P. 222509-3.

20. Podzorov V., Kim B. G., Kiryukhin V., Gershenson M. E., Cheong S.-W. Martensitic accommodation strain and the metal-insulator transition in manganites. *Phys. Rev. B*. 2001, Vol. 64, P. 140406(R).

21. Shannon R. D., Beirlein J. D., Gillon J. L. Polymorphism in $Bi_2Sn_2O_7$. *J. Phys. Chem. Solids*. 1980, Vol. 41, P. 117–122.

22. Aron Walsh, Graeme W. Watson, David J. Payne. A theoretical and experimental study of the distorted pyrochlore $Bi_2Sn_2O_7$. *J. Mater. Chem*. 2006, Vol. 16, P. 3452–3458.

23. Jenlrzejewska I., Mroziski J., Zajdel P. X-Ray and magnetic investigations of the polycrystalline compounds with general formula $Zn_xSn_yCr_zSe_4$. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2009, Vol. 54, P. 723–730.

24. Weiss A., Witte H. *Kristallstrukture und chemische Bindung*. Verlag Chemie, Weinheim, 1983.

25. Pandit A. A., More S. S., Dorik R. G. Structural and magnetic properties of $Co_{1+y}Sn_yFe_{2-2y-x}Cr_xO_4$ ferrite system. *Bull. Mater. Sci*. 2003, Vol. 26, P. 517–521.

© Удод Л. В., Ситников М. Н., 2015

УДК 537.525.5

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 983–989

МЕХАНИЗМЫ ИОНИЗАЦИИ В КАТОДНОМ ПЯТНЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ

А. В. Ушаков[1, 2], И. В. Карпов[1, 2*], А. А. Лепешев[2, 3]

[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
[3]Красноярский научный центр СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

В рамках дрейфово-диффузионного представления рассматривается модель катодного пятна вакуумной дуги. Использование дрейфово-диффузионного приближения избавляет от необходимости расчета функций распределения частиц по энергиям, а также учета различных энергетических реакций, которые не сопровождаются изменением заряда частиц. Показано, что напряженность поля плазменного столба существенно понижена. Сам столб окружен объемным зарядом медленных положительных ионов, обеспечивающим высокую напряженность поля перед ним. На стадии сформировавшегося плазменного котла ионизация металлического пара идет преимущественно в тонком слое перед облаком ионов, а в столбе преобладает рекомбинация ионов.

Ключевые слова: вакуумная дуга, катодное пятно, дрейфово-диффузионное представление.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 983–989

MODELING OF METAL VAPOR IONIZATION PROCESSES IN THE CATHODE SPOT OF A VACUUM ARC

A. V. Ushakov[1, 2], I. V. Karpov[1, 2*], A. A. Lepeshev[2 3]

[1]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[3]Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[*]E-mail: sfu-unesco@mail.ru

In this paper the model of the cathode spot of a vacuum arc is considered in the framework of the drift-diffusion representation. The use of the drift-diffusion approximation allows doing without calculation of the functions of particle distribution by energy, as well as without taking into account different energy reactions, which are not associated with change in particle charge. Using the average characteristics of positively and negatively charged ions, while their parameters are taken from experiment, eliminates the need to take into account a large number of basic reactions of interaction between the various components of metal vapor. It is shown that the field intensity of the plasma column is significantly reduced. The given column is surrounded by the bulk charge of slow positive ions, providing high field intensity in front of it. While forming a plasma reaction zone, ionization of the metal vapor occurs mainly in a thin layer in front of the ion cloud, and the ion recombination predominates in this column. Ionization provides a constant elongation of conducting plasma column and moving the bulk charge layer on the outer boundary of the current state, i.e., towards the cathode. This, in turn, leads to a displacement of the local maximum of the electric field and to the displacement of the zone of intense ionization, and provides the movement of the so-called ionization wave. The field intensity in the plasma channel is less than in front of it. The field intensity it is too low and the impact of ionization in the channel does not occur. The key role is played by the loss of electrons due to recombination process.

Keywords: Vacuum arcs, Cathode spots, vacuum, drift-diffusion approximation.

Введение. Повышение конкурентоспособности изделий в аэрокосмической отрасли в значительной степени связано с разработкой, созданием и использованием перспективных материалов различного функционального назначения. К важнейшим достижениям материаловедения конца XX столетия, способствующим развитию специального машиностроения, наряду с получением композитов на основе стекло-, угле- и борволокон, материалов с памятью формы, суперсплавов, жаростойких пористых керамик и др. следует отнести разработку нового класса прецезионных сплавов – аморфных и нанокристаллических материалов. Особенностью таких материалов является высокий уровень химических, механических, электромагнитных, каталитических и других свойств, а главное – их уникальное сочетание, которое не достигается в традиционных кристаллических сплавах.

Одним из перспективных направлений улучшения характеристик материалов является добавление к основной матрице небольшой доли наномодификаторов, основу которой составляют наночастицы или их смеси с заданной дисперсностью, структурой и физико-химическими свойствами. В результате это приводит к повышению эксплуатационных характеристик изделий и расширению спектра их функционального назначения.

В связи с этим возникают задачи по разработке высокоэффективных способов и методов получения нанопорошков. Одним из таких методов является получение нанопорошков в плазме дугового разряда низкого давления. При использовании данного метода возникают задачи по теоретическому исследованию процессов, происходящих в катодном пятне, и выделению параметров, оказывающих наибольшее влияние на физико-химические свойства нанопорошков [1–9].

Еще до разработки вакуумных насосов понятие вакуумной дуги было впервые введено Майкельсоном и Миликеном в 1900 году. В 1904 году лордом Кельвином было дано первое разумное объяснение этому сложному явлению. С физической точки зрения, однако, дугу более точно характеризуют другие ее свойства [10]:

1) относительно низкое напряжение горения разряда, приближающееся в коротких дугах к величине ионизационного потенциала атомов металла катода или среды;

2) чрезвычайно большая плотность тока у поверхности катода, достигающая 10^6 А/см^2 и более;

3) высокие концентрации частиц в катодной области разряда.

Первая из указанных особенностей навела Штарка на мысль дать определение дуги как разряда, в котором ионизация газа осуществляется исключительно электронами [10]. Из этого определения вытекало непосредственно, что известная часть электронов, принимающих участие в разряде, должна эмитироваться катодом [11]. Таким образом, исключительное значение для понимания механизма дуги приобретали процессы, происходящие у катода. Все последующее изучение дуги подтвердило, что основной аппарат этого разряда, обеспечивающий регенерацию зарядов, сосредоточен в тонком слое металлического пара у поверхности катода [12].

Для понимания механизма дуги оказывается существенным неоднородное распределение электрического поля между электродами [13]. Вследствие образования положительного объемного заряда у катода возникает так называемая область катодного падения, принимающая на себя значительную часть общего перепада напряжения между электродами [14]. При этом, как и в тлеющем разряде, максимальная напряженность поля, намного превышающая средние значения, оказывается непосредственно у поверхности катода [15]. Однако катодное падение в дуговом разряде примерно на порядок ниже, чем в тлеющем, и приближается к ионизационному потенциалу газов или паров металла, в атмосфере которых поддерживается разряд.

Резкое уменьшение величины катодного падения напряжения при переходе от тлеющего разряда к дуговому должно означать, что механизм регенерации зарядов при этом переходе становится более эффективным [16]. Об этом свидетельствуют и поразительно высокие плотности тока у катода дуги [17]. Последнее обстоятельство дополнительно указывает на то, что вблизи поверхности катода должна существовать область с чрезвычайно высокой концентрацией атомов. В разряде низкого давления, а тем более в вакуумной дуге, единственным источником необходимой высокой концентрации частиц в катодной области разряда может служить испарение катода и выделение поглощенных им газов.

В данной работе в рамках дрейфово-диффузионного представления рассматривается модель катодного пятна вакуумной дуги.

Все указывает на то, что у дуговых разрядов много общего с искровыми разрядами, однако из-за небольшой протяженности катодного пятна использовать традиционные модели таундсендовского лавинно-стримерного механизма производства плазмы нельзя.

Система дифференциальных уравнений в частных производных решалась в программном пакете Comsol методом конечных элементов.

Постановка задачи. Поскольку все процессы, протекающие в катодном пятне, имеют характерные времена 5–100 нс, то для решения задачи об ионизации достаточно решить дрейфово-диффузионные уравнения Нернста–Планка–Эйнштейна, дополненные уравнением Пуассона, пренебрегая процессами образования плазмы, электронейтральности и т. д., что позволило выявить влияние отдельных механизмов ионизации на структуру и динамику развития катодного пятна:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div}\left[-D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \vec{E}\right] = \\ = v_{ion}(E) n_e - v_{att}(E) n_e - c_{ee} n_e n_+ + S_{ph} + S_{un}, \\ \dfrac{\partial n_+}{\partial t} + \operatorname{div}\left[-D_+ \nabla n_+ - \mu_+ n_+ \vec{E}\right] = \\ = v_{ion}(E) n_e - c_{ee} n_+ n_e + S_{ph} + S_{un}, \\ \Delta\varphi = -\left(\dfrac{e}{\varepsilon_0}\right)(n_+ - n_e); \vec{E} = -\nabla\varphi, \end{cases}$$

где n_e, n_+ – концентрации электронов и ионов соответственно; φ – электрический потенциал.

Функция источников для электронов учитывает рождение за счет ударной ионизации с частотой $\nu_{ion}(E)$, гибель при прилипании с частотой $\nu_{att}(E)$, гибель при электрон-ионной рекомбинации с коэффициентом c_{ee}. Функция источника для положительных ионов учитывает рождение за счет ударной ионизации и гибель при электрон-ионной рекомбинации (для последней задан коэффициент c_{ee}).

Для выявления влияния разных источников ионизации на структуру и динамику катодного пятна влиянием фотоионизации пренебрегали (S_{ph} = 0, S_{un} = 0). Потоки концентрации ионов и электронов $N_e = -D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \vec{E}$, $N_+ = -D_+ \nabla n_+ - \mu_+ n_+ \vec{E}$ учитывают соответственно диффузионную и дрейфовую составляющую.

Соотношение Эйнштейна описывает связь между подвижностью частиц и их коэффициентом диффузии, оно выполняется в условиях термодинамического равновесия, когда у частиц максвелловское распределение по энергии. Это условие при не слишком высоких полях хорошо выполняется для ионов и совершенно не выполняется для электронов. Поэтому для положительных и отрицательных ионов коэффициент диффузии оценивался по формуле

$$D_i = \frac{kT_i}{e} \cdot b_i ,$$

где T_i и b_i – температура и подвижность ионов. Поскольку рассматриваемые промежутки времени не более 10 нс, то за это время, согласно приведенной выше формуле, ионы сместятся максимум на 1 мкм, поэтому диффузия и подвижность ионов в не слишком больших полях можно считать постоянной и равной $3{,}7 \cdot 10^{-3}$ м^2/с.

Частота и коэффициент ионизации связаны формулой:

$$a_{ion}(E,P) = b_e(E,P) \cdot \nu_{ion}(E,P).$$

Полагая, что в дуговом разряде отсутствуют отрицательные ионы, о чем свидетельствуют и многочисленные исследования, коэффициентом прилипания можно пренебречь.

У коэффициента рекомбинации электрона с простыми ионами (c_{ei}) основной канал рекомбинации – диссоциативный. При моделировании задавалось постоянное значение $c_{ei} = 10^{-13}$ м^3/с, так как он слабо меняется в исследуемом диапазоне напряженности электрического поля.

В модели решалась нестационарная одномерная задача с однородным полем. Схема расчетной области приведена на рис. 1. Эмиссия электронов осуществлялась из катода 1 и была постоянна во времени. Эмиссия электронов учитывалась в виде незначительной (10^{16} м$^{-3}$) начальной концентрации на границе 1. Предполагалось, что эмиссионные электроны являются «затравочными» для начала основных ионизационных процессов. Процессы ионизации и рекомбинации происходили в разрядном промежутке и учитывались в виде скорости реакции. Начальная концентрация ионов была выбрана из соображений основного падения потенциала на разрядном промежутке и находится в области 2. Начальная концентрация ионов и электронов в разрядном промежутке равна нулю.

Рис. 1. Схема расчетной области для одномерной нестационарной модели

Граничные условия для катодной области представлены в виде

$$-\vec{n}\left[-D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \vec{E}\right] = 0, \quad -\vec{n}\left[-D_+ \nabla n_+ - \mu_+ n_+ \vec{E}\right] = 0.$$

Граничные условия для области 2 были взяты из условий процессов ионизации и рекомбинации, а также диффузионных и дрейфовых процессов в разрядном промежутке. Например, можно представить их следующим образом: $-\vec{n}\left[-D_e \nabla n_e - \mu_e n_e \vec{E}\right] = N_{0e}$, $-\vec{n}\left[-D_+ \nabla n_+ - \mu_+ n_+ \vec{E}\right] = N_{0+}$, где N_{0e} и N_{0+} постоянные во времени величины потоки ионов и электронов.

Результаты и обсуждение. Проанализируем основные этапы развития дугового разряда. На рис. 2–7 показано развитие дугового разряда в различные моменты времени. На рис. 2 показано изменение концентрации электронов, эмитируемых катодом в процессе движения к ионному облаку. Количество электронов в нем постепенно нарастает под действием ударной ионизации, а радиус облака увеличивается из-за диффузии. Объемный заряд пока слишком мал, чтобы заметно изменить электрическое поле. Это начальная фаза.

В процессе развития разряда отчетливо проявляются два максимума концентрации электронов. Первый, основной, максимум – в прикатодной области, второй – рядом с ионным облаком. Появление второго максимума вызвано первыми немногочисленными электронами, достигшими ионного облака. Из-за диффузии отдельные электроны достигают его раньше, чем до него доходит основная часть электронов. Эти электроны из-за высокой напряженности поля вблизи ионов и, как следствие, высокой частоты ионизации, приводят к быстрому повышению концентраций непосредственно у ионного облака. Этот максимум быстро обгоняет первый по величине и в момент t = 2,8 нс становится заметным на его фоне. Тем не менее, поскольку скорость ионизационных процессов значительно выше скорости дрейфа электронов, первый максимум начинает интенсивно расти, и в момент времени 4,2 нс они сравниваются.

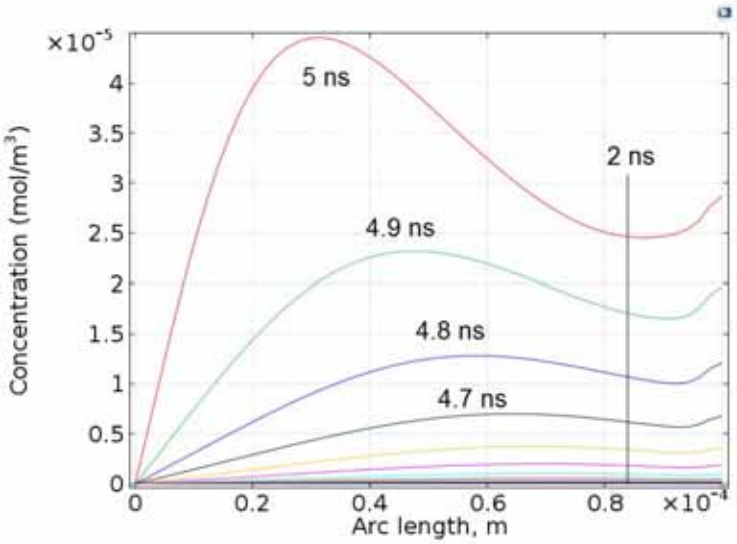


Рис. 2. Графики изменения концентрации электронов в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

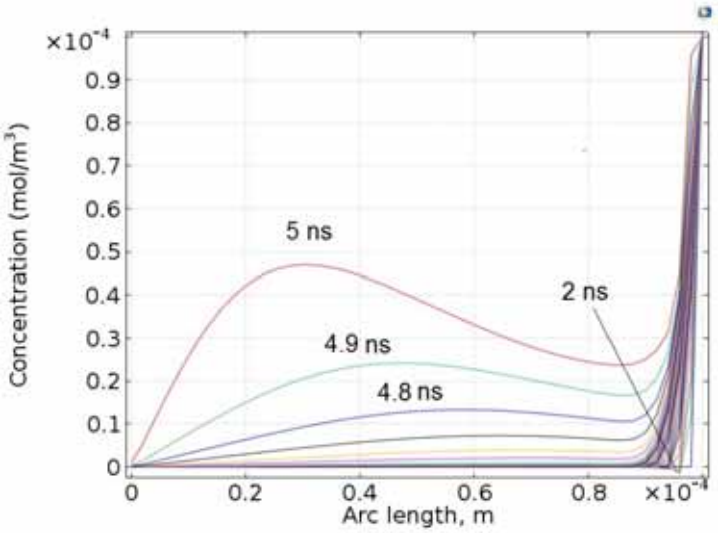


Рис. 3. Графики изменения концентрации ионов в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

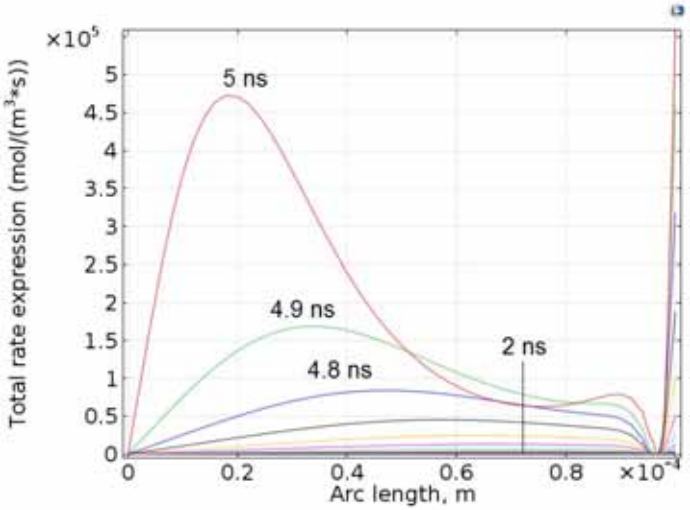


Рис. 4. Графики интенсивности ионизации в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

Благодаря интенсивной ионизации в прикатодном слое постепенно накапливается нескомпенсированный положительный заряд (рис. 5), который через некоторое время начинает существенно влиять на внешнее электрическое поле (рис. 6, 7), вытесняя его из области повышенной концентрации электронов на границу этой области. Туда же смещается и область повышенной ионизации (см. рис. 4). Это приводит к повышению концентрации ионизованных частиц перед границами (см. рис. 3), и область повышенной концентрации заряженных частиц вновь изменяет свои границы. От ионного облака начинает прорастать электронное облако навстречу катоду, в этом смысле его можно назвать «отраженным» электронным облаком. При этом область повышенной концентрации электронов переходит в состояние плазмы – поле оттуда вытеснено, объемного заряда практически нет.

Это соответствует сложившимся представлениям о структуре сформировавшегося катодного пятна, для которого характерно наличие плазменного канала, поле из которого вытеснено на внешнюю границу канала [10]. Максимум поля при этом оказывается на передней границе катодной области и ионного облака (рис. 6). Если дуговой разряд развивался в поле, образованном электродами, практически не влияя на него, то с момента образования плазменного канала проводящая область прорастает за счет вновь образующейся плазмы, деформируя при этом поле, образуя «плазменный котел». Эти максимумы становятся новыми центрами ионизационных процессов, в которых в качестве затравочных электронов участвуют эмиссионные электроны. В результате ионизации возникает новая плазменная область с высокой концентрацией электронов, удлиняющая и сужающая плазменный канал, вытесняя при этом электрическое поле. Так движется волна ионизации.

Скорость нарастания тока дугового разряда – это скорость волны ионизации, которая может быть значительно выше скорости перемещения ионов [13].

Напряженность поля в плазменном канале меньше, чем на фронте. Поле в нем слишком низкое, и ударной ионизации в канале не происходит, здесь ключевую роль играет гибель электронов в результате рекомбинации.

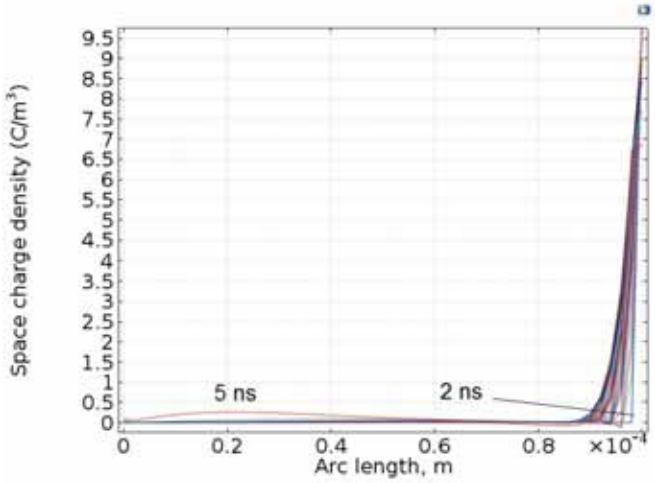


Рис. 5. Графики распределения объемного заряда [Кл/м^3] в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

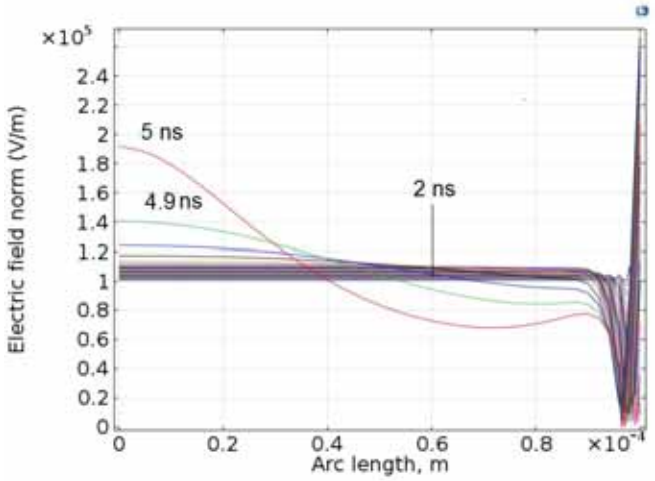


Рис. 6. Графики напряженности электрического поля [В/м] в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

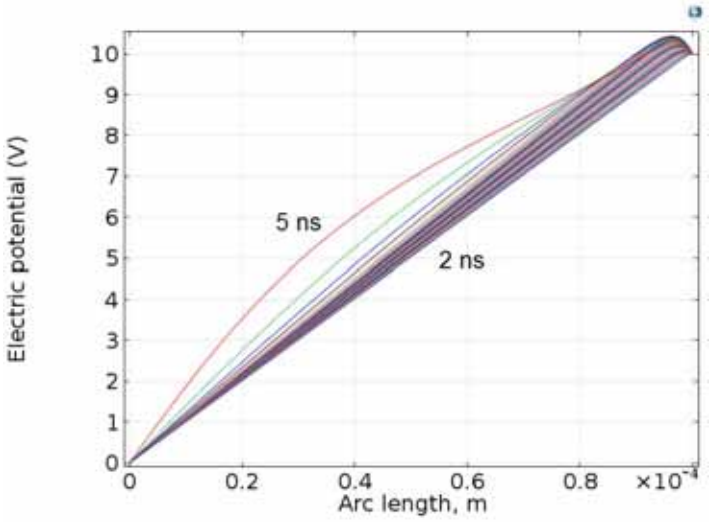


Рис. 7. Графики электрического потенциала [В] в прикатодной области в моменты времени от 2 до 5 нс с шагом 0,1 нс

Заключение. В работе в рамках компьютерной модели катодного пятна рассчитана структура плазменного столба в однородном поле.

Основным преимуществом данной модели является использование минимально возможного количества уравнений для описания всех основных параметров катодного пятна вакуумного дугового разряда. Использование дрейфово-диффузионного приближения избавляет от необходимости расчета функций распределения частиц по энергиям, а также учета различных энергетических реакций, которые не сопровождаются изменением заряда частиц. Использование усредненных характеристик положительно и отрицательно заряженных ионов, параметры которых берутся из эксперимента, избавляет от необходимости учитывать большое количество основных реакций взаимодействия между различными компонентами металлического пара.

Показано, что напряженность поля плазменного столба существенно понижена. Сам столб окружен объемным зарядом медленных положительных ионов, обеспечивающим высокую напряженность поля перед ним. На стадии сформировавшегося плазменного котла ионизация металлического пара идет преимущественно в тонком слое перед облаком ионов, а в столбе преобладает рекомбинация ионов.

Ионизация обеспечивает постоянное удлинение проводящего плазменного столба и перемещение слоя объемного заряда на внешнюю границу текущего состояния, т. е. в направлении от катода. Это, в свою очередь, приводит к перемещению локального максимума электрического поля и зоны интенсивной ионизации и обеспечивает движение так называемой волны ионизации.

Благодарности. Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ. Проект № 15-08-02132 «Исследование вакуумных плазмохимических процессов испарения и конденсации материала в пароплазменных потоках с последующим формированием наночастиц с уникальными физико-химическими свойствами».

Acknowledgments. This work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No 15-08-02132).

Библиографические ссылки

1. Technology Ready Use For Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low-Pressure Pulsed Arc Discharge / А. В. Ушаков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 485–490.

2. Enhancing of magnetic flux pinning in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$/CuO granular composites / A. V. Ushakov [et. al.] [Electronic resource] // J. Appl. Phys. 2015. № 118 (2). P. 023907. URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.4926549.

3. Федоров Л. Ю., Ушаков А. В., Карпов И. В. Study of Carbide Formation in the Plasma of a Low-Pressure Pulsed Arc Discharge // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 2. С. 491–495.

4. Метод получения нанодисперсных материалов в плазме импульсного дугового разряда низкого давления / И. В. Карпов [и др.] // ЖТФ. 2014. № 84 (4). С. 93–97.

5. 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.

6. Особенности поведения электродуговых наночастиц CuO в магнитном поле / А. В. Ушаков [и др.] // ФТТ. 2015. № 57 (5). С. 903–907.

7. Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А. Влияние концентрации кислорода на формирование кристаллических фаз наночастиц ZrO_2 в процессе синтеза в плазме дугового разряда низкого давления // ФТТ. 2015. № 57 (11). С. 2251–2253.

8. 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.

9. Mechanical and Tribological Properties of Complex-Modified Material Based On Ultra High Molecular

Weight Polyethylene / L. Yu. Fedorov [et. al.] // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35, no. 1. P. 7–11. Doi: 10.3103/S1068366614010103.

10. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М. : Наука, 1968. 244 с.

11. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М. : Наука, 1970. 520 с.

12. Харрис Л. Катодные процессы. Вакуумные дуги. М. : Мир, 1982. С. 153–209.

13. Daalder J. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs // J. Phys. D: Appl. Phys. 1975. № 8 (14). P. 1647–1659.

14. Rakhovskii V. Experimental Study of the Dynamics of Cathode Spots Development // IEEE Transactions on Plasma Science. 1976. № 4 (2). P. 81–102.

15. Любимов Г., Раховский В. Катодное пятно вакуумной дуги // УФН. 1978. № 125 (4). С. 665–706.

16. Плютто А. А., Рыжков В. Н., Капин А. Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг // ЖЭТФ. 1964. № 47 (2). С. 494–507.

17. Проскуровский Д., Пучкарев В. Образование новых эмиссионных центров на катоде в процессе коммутации электрического тока в вакууме. 2. Проявление установленных закономерностей в вакуумных разрядах // ЖТФ. 1979. № 49 (12). С. 2619–2622.

References

1. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Shaikhadinov A. A., Fedorov L. Yu. [Technology Ready Use For Producing Nanomaterials in the Plasma of a Low-Pressure Pulsed Arc Discharge]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 485–490 (In Russ.).

2. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Petrov M. I. Enhancing of magnetic flux pinning in $YBa_2Cu_3O_{7-x}$/CuO granular composites. *J. Appl. Phys*., 2015, Vol. 118, No 2, P. 023907. Doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4926549.

3. Fedorov L. Yu., Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Shaikhadinov A. A. [Study of Carbide Formation in the Plasma of a Low-Pressure Pulsed Arc Discharge]. *Vestnik SibGAU*. 2015, Vol. 16, No. 2, P. 491–495 (In Russ.).

4. 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. *Technical Physics*, 2014, Vol. 84, No. 4, P. 559–563.

5. 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.

6. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A., Petrov M. I., Fedorov L. Yu. Specific Features of the Behavior of Electroarc CuO Nanoparticles in a Magnetic Field. *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57, No. 5, P. 919–923.

7. Ushakov A. V., Karpov I. V., Lepeshev A. A. The influence of oxygen concentration on the formation of crystalline phases ZrO_2 nanoparticles during the synthesis of the plasma arc discharge of low pressure. *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57, No. 11, P. 2251–2253.

8. 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.

9. 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.

10. Kesaev I. G. *Katodnye protsessy elektricheskoy dugi.* [Cathodic processes of electric arc]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 244 p.

11. Rakhovskii V. I. *Fizicheskie osnovy kommutatsii elektricheskogo toka v vakuume.* [Physical bases of switching electric current in a vacuum]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 520 p.

12. Harris L. *Katodnye protsessy. Vakuumnye dugi.* [Cathode processes. Vacuum arcs.] Moscow, Mir Publ., 1982, P. 153–209 (In Russ.).

13. Daalder J. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs. *J. Phys. D: Appl. Phys*. 1975, Vol. 8, No. 14, P. 1647–1659.

14. Rakhovskii V. Experimental Study of the Dynamics of Cathode Spots Development. *IEEE Transactions on Plasma Science.* 1976, Vol. 4, No. 2, P. 81–102.

15. Lyubimov G., Rakhovskiy V. *Katodnoe pjatno vakuumnoj dugi.* [The cathode spot of a vacuum arc]. *Physics-Uspekhi*. 1978, Vol. 125, No. 4, P. 665–706 (In Russ.).

16. Plyutto A. A., Ryzhkov V. N., Kapin A. T. *Vysokoskorostnye potoki plazmy vakuumnykh dug* [High vacuum arc plasma flows]. *ZhJeTF*. 1964, Vol. 47, No. 2, P. 494–507 (In Russ.).

17. Proskurovskiy D., Puchkarev V. [The formation of new emission sites on the cathode during electric current switching in vacuo. 2. Display of the established laws in a vacuum discharge]. *ZhTF*. 1979, Vol. 49, No. 12, P. 2619–2622 (In Russ.).

© Ушаков А. В., Карпов И. В., Лепешев А. А., 2015

Раздел
Part
4

ЭКОНОМИКА

ECONOMICS AEROSPACE INDUSTRY

УДК 334.7:65.014

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 992–996

РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ СОЗДАНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ СТРУКТУРЫ

Г. П. Беляков, Г. А. Карачёва

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

Ракетно-космическая промышленность относится к весьма перспективной сфере деятельности, приносящей большой вклад в экономику и обороноспособность различных стран. Стратегией развития отечественной ракетно-космической промышленности, рядом государственных и федеральных целевых программ предусматривается формирование экономически устойчивой, конкурентоспособной, диверсифицированной отрасли, достижение технологического лидерства и необходимого присутствия нашей страны в космическом пространстве.

Задачи, определенные данной стратегией, требуют концентрации усилий во многих областях деятельности ракетно-космической промышленности. Сложность решения этих задач связана с преодолением накопившихся проблем в отрасли и организационными ошибками, допущенными в процессе реформирования предприятий ракетно-космической промышленности. Доставшийся от советских времен ракетно-космический комплекс оказался слишком громоздким и неподъемным, его реформирование сводилось к сокращению размеров комплекса с сохранением наиболее эффективных и стратегически важных направлений.

Произошедшие организационные изменения в процессе реформирования лишь частично решили проблемы отрасли. В настоящее время возникла необходимость в новом этапе дальнейшего совершенствования структуры ракетно-космической промышленности, что обосновывает актуальность работы.

В результате анализа реформирования отечественной ракетно-космической промышленности в работе выделены основные его этапы, обозначены проблемы отрасли. На основании выявленных проблем обоснована необходимость проведения реструктуризации предприятий ракетно-космической промышленности в условиях создания корпоративной структуры. Также предложены основные направления реструктуризации предприятий в корпоративной структуре отрасли.

Ключевые слова: реструктуризация предприятий, реформирование предприятий, ракетно-космическая промышленность, корпоративные структуры.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 992–996

RESTRUCTURING OF ENTERPRISES OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY IN TERMS OF ESTABLISHING A CORPORATE STRUCTURE

G. P. Belyakov, G. A. Karacheva

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

Rocket and space industry is in a very promising area of activity, bringing a major contribution to the economy and defense capability in different countries. The strategy of development of the domestic space industry, a number of state and federal target program envisage the formation of economically sustainable, competitive, diversified industry, the achievement of technological leadership and the need for the presence of our country in space.

The problems identified by this strategy require concentration of efforts in many areas of the aerospace industry. The complexity of these tasks is associated with overcoming the problems that have accumulated in the industry and organizational mistakes made in the process of reforming of the space industry. Inherited from the Soviet era rocket and space complex was too bulky and very heavy, its reform is to reduce the size of the complex while maintaining the most effective and strategically important areas.

Organizational changes have taken place in the reform process, only partially solved the problems of the industry. Currently, there was a need in the new stage of further improving the structure of the rocket and space industry, which justifies the relevance of the work.

An analysis of the reform of the national rocket and space industry, highlighted in its basic stages, marked the industry's problems. Based on the issues identified the necessity of carrying out restructuring of the space industry in terms of creating a corporate structure. Also provided are the main directions of restructuring of the corporate structure of the industry.

Keywords: enterprise restructuring, enterprise reform, rocket and space industry, corporate structure.

Введение. Россия является одной из немногих стран в мире, обладающей уникальной ракетно-космической промышленностью, которая обеспечивает безопасность государства, социально-экономическое развитие науки, страны и международного сотрудничества, гарантированный доступ и необходимое присутствие нашей страны в космическом пространстве. Ракетно-космическая промышленность (РКП) характеризуется наукоемкими производственными процессами, высокотехнологичными создаваемыми изделиями и обладает высокими инновационными возможностями, эффективная реализация которых способна оказать существенное влияние на развитие экономики России [1].

Стратегией развития РКП, Федеральной космической программой, государственными программами в области космической деятельности и вооружения, рядом федеральных целевых программ определены задачи по созданию ракетно-космической техники нового поколения, развертыванию и поддержанию необходимого состава космических аппаратов научного и социально-экономического назначения, сохранению конкурентных преимуществ на мировом рынке пусковых услуг российских средств выведения, обеспечению международного сотрудничества в области использования космического пространства [2–4].

Данные задачи требуют концентрации усилий, направленных на техническое перевооружение и модернизацию РКП, разработку и внедрение промышленных критических технологий мирового уровня, наращивание масштабов государственной поддержки космической деятельности.

Одновременно, сложность решения этих задач связана с преодолением накопившихся проблем, вызванных недостатком финансовых ресурсов, ограниченных узкими рамками госзаказа и федеральных целевых программ, высокими затратами на научные разработки отдельных предприятий, организационными ошибками, допущенными в процессе реформирования предприятий РКП.

Реформирование РКП. В советское время координация деятельности всех предприятий и организаций РКП, задействованных в создании и производстве ракетно-космической техники, обеспечивалась за счет четкой системы плановых заданий, приоритетного обеспечения ресурсами, повышенного контроля со стороны государства, которое в полном объеме покрывало расходы предприятий отрасли. В период перестройки многие связи предприятий и организаций были разрушены. Отсутствие государственного оборонного заказа, необходимого финансирования, возникшие долги предприятий заставили их искать выход из создавшегося положения в одиночку. Многие предприятия были включены в приватизацию, в результате которой государство частично утратило возможность управления ракетно-космической отраслью [5].

В 1990-х гг. финансирование отрасли существенно сократилось по многим направлениям более чем в 15 раз, космическая группировка сократилась в 2,5 раза, значительно снизились объемы инвестиций, темпы обновления основных фондов упали практически до нуля, произошел интенсивный отток квалифицированного персонала [6]. Это повлекло за собой подорожание разработок технического и технологического характера, снижение качества и надёжности производимой техники и оборудования, утрату уникальных ключевых технологий космического машиностроения.

В начале 2000-х гг. началось постепенное восстановление РКП, финансирование государственного оборонного заказа увеличивалось каждый год, сформировалась устойчивая тенденция укрепления научного, производственно-технологического и кадрового потенциалов. Но доставшийся от советских времен ракетно-космический комплекс оказался слишком громоздким и неподъемным, поэтому последующие преобразования сводились к дальнейшему сокращению его размеров с сохранением наиболее эффективных и стратегически важных направлений.

Существенное влияние на это оказала государственная политика реформирования оборонной отрасли, которая предусматривала интеграцию предприятий РКП с образованием крупных проектно-производственных структур, ориентированных на разработку и производство ракетно-космической техники повышенной надежности, осуществление услуг в сфере космической деятельности. Необходимо отметить, что основными предпосылками их интеграции являлись: усиление рыночной конкуренции; стремление к снижению производственных издержек; требования к снижению рисков за счет диверсификации деятельности; централизация выполнения сбытовой функции; повышение эффективности производства; расширение рынков сбыта; привлечение инвестиций; необходимость финансового оздоровления предприятий [7].

В свою очередь, создание крупных интегрированных структур позволило определить основные задачи в области их развития:

– восстановление связей предприятий, задействованных в создании и производстве конечной продукции;

– обеспечение единства технологической цепочки от зарождения идеи до изготовления продукции;

– проведение единой технической политики;

– эффективное управление процессом создания и производства ракетно-космической техники;

– уменьшение потерь путем устранения дублирования исследований, разработок и концентрации усилий на прорывных направлениях;

– постоянная работа по созданию задела новых разработок;

– использование двойных технологий в производстве гражданской продукции;

– привлечение дополнительных инвестиций в создание и производство ракетно-космической техники.

Весь происходящий с ракетно-космической отраслью процесс реформирования можно обозначить тремя этапами. На первом этапе (2001–2006 гг.) создавались холдинговые компании за счет объединения головных предприятий РКП с основными поставщиками комплектующих для производства ракетно-комической техники. Примерами созданных структур холдингового типа являются ОАО «ВПК «НПО машиностроения»; ОАО «Информационные спутниковые системы»; ОАО «ГРЦ им. ак. В. П. Макеева»; ОАО «Российские космические системы»; ОАО «НПК «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы»; ОАО «НПК СПП». Вместе с тем в созданных холдинговых структурах не были полностью решены задачи по технологической кооперации, взаимосвязи всех звеньев единой технологической цепочки [8].

Второй этап реформирования РКП (2007–2012 гг.) предусматривал объединение холдинговых компаний с научно-исследовательскими и конструкторскими организациями (в странах Европы и США создавались корпоративные структуры в виде диверсифицированных национальных и транснациональных корпораций [9–10]). Первой корпорацией в РКП стала РКК «Энергия» им. С. П. Королева», объединившая 4 предприятия. В период с 2010 по 2012 гг. были образованы ОАО «Корпорация «МИТ», ОАО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета», ОАО «Корпорация «Стратегические пункты управления» [11].

В процессе реформирования было создано 14 интегрированных структур [12] в форме холдингов и корпораций, доминирующую роль в создании которых играли организационные меры реформирования предприятий, перераспределение заказов и финансовых потоков. К особенностям их создания следует отнести:

– высокую степень государственного участия в существующих организационных формах предприятий, входящих в состав отрасли;

– исторически сложившейся комплексный характер производственно-хозяйственной деятельности предприятий;

– широкую внутриотраслевую и межотраслевую кооперацию, большое число соисполнителей в процессе проектирования, изготовления и испытания изделий;

– удаленность предприятий в корпоративных структурах РКП на территории РФ;

– сочетание военного и гражданского производства продукции;

– высокий уровень требований к качеству, надежности, ресурсу изделий, культуре производства.

Третий этап реформирования (2013–2015 гг.) предполагает уже другой характер усилий в развитии РКП и требует более квалифицированных управленческих решений на рынках ракетно-космической техники, гражданской продукции и капитала. От государства ожидается активная работа по стимулированию рынков продукции новых диверсифицированных корпораций, организация взаимодействия с частным бизнесом в рамках совместного управления предприятиями РКП [13]. Данный этап нашел воплощение в создании Объединенной ракетно-космической корпорации (ОАО «ОРКК»), которая реализует единую техническую политику создания современной ракетно-космической техники, централизует закупки электронной компонентной базы и обеспечивает комплексное реформирование ракетно-космической отрасли.

В настоящее время планируется создание государственной корпорации на базе ОАО «ОРКК» и Федерального космического агентства, которая объединит в себе управленческие и хозяйственные функции, что позволит решать сложные, многоплановые задачи, стоящие перед космической отраслью.

Реструктуризация предприятий РКП. В целом создание корпоративных структур РКП можно считать завершенным. Данный процесс осуществлялся в основном за счет организационных мероприятий, главными задачами которых являлись присоединение и укрупнение разрозненных предприятий отрасли, решение финансовых проблем.

Произошедшие организационные изменения лишь частично решили проблемы отрасли. В настоящее время возникла необходимость в новом этапе дальнейшего совершенствования структуры РКП. Отрасль существует за счет прошлых научно-технических, конструкторских и технологических заделов. Запас этих заделов неуклонно истощается из-за недостатка финансовых ресурсов, ограниченных узкими рамками госзаказа и федеральных целевых программ, и приводит к приостановке перспективных исследований и разработок, их удорожанию [14; 15]. Научные разработки становятся слишком затратными, вследствие чего предприятиям РКП все труднее конкурировать с западными корпорациями. Для того чтобы рационально выстроить систему управления и производство всей корпоративной структуры РКП, требуется реструктуризация каждого из ее предприятий.

Следует отметить, что в 1990–2000 гг. проблема реструктуризации коснулась многих промышленных предприятий. Поэтому в тот период данному процессу уделялось большое внимание. Не все предприятия смогли перестроиться на путь рыночной экономики. Их банкротство, меры государственной поддержки, которые не всегда приносили ожидаемого эффекта, рост износа основных средств, утечка кадров требовали серьезных мер по реструктуризации. Реструктуризация являлась общей проблемой практически всех предприятий и в соответствии с этим вызывала пристальное внимание ученых. Основные вопросы реструктуризации предприятий, практика ее проведения, рассмотрены в работах Л. П. Белых, М. А. Федотовой, И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, В. Н. Тренева, В. Г. Балашова, Д. В. Ерохина, О. В. Нифаевой, Б. Н. Авдонина, А. Н. Белковского, И. М. Муракаева, М. Симутова, Е. Ю. Хрусталева, О. Фаличева, А. Фролова и других авторов. Несмотря на значительное количество выполненных исследований, серьезные работы, отражающие реструктуризацию предприятий при создании корпоративных структур, отсутствуют, что позволяет более основательно подойти к выбранной теме.

Отметим, что предприятия РКП стремились как можно полнее обеспечить весь цикл разработки и производства продукции. Это позволяет обеспечить высокий уровень надежности работы, но совершенно не подходит для работы в рыночных условиях. Перед многими предприятиями стоит проблема ухода от «натурального хозяйства» и перехода к полноценному использованию внутреннего аутсорсинга, который позволит предприятиям достичь высокой эффективности производства благодаря рациональному использованию установленных мощностей и более совершенному использованию имеющихся ресурсов.

В настоящее время созданным корпоративным структурам РКП необходимо рационально выстраивать систему управления своими предприятиями, проводить диверсификацию производства на основе интеграции военного и гражданского производства, что позволит обеспечить высокий уровень надежности работы корпоративной структуры.

Организация производства ракетно-космической техники в корпоративной структуре РКП по единой технологической цепочке приведет к исключению дублирования повторяющихся видов производств, снижению издержек выполнения государственного оборонного заказа путем конструкторской и технологической унификации, рационального разделения труда, выведения избыточных мощностей из сферы военного производства и неиспользуемого имущества из оборота.

Также необходимо совершенствовать систему подготовки и закрепления кадров на предприятиях РКП с целью повышения профессионализма и квалификации работников предприятий в корпоративной структуре.

Разработка единых требований к управлению и организации производства путем создания единой корпоративной политики в области менеджмента качества позволит повысить конкурентоспособность ракетно-космической продукции на мировом космической рынке.

В корпоративных структурах необходимо совершенствовать финансово-экономический механизм с целью эффективного использования консолидированных финансов для финансирования разработок космических систем нового поколения военного и гражданского назначения, проведения поисковых и прикладных НИОКР, модернизации существующих систем и повышения финансовой устойчивости корпоративной структуры.

Заключение. Решение обозначенных проблем ракетно-космической промышленности требует определения новых походов к процессу реструктуризации предприятий, формирования новых хозяйственных отношений, адекватных внешней и внутренней среде, складывающихся в процессе производственной деятельности корпорации.

Библиографические ссылки

1. Муракаев И. М., Бочкарев К. М. Россия: тенденции и перспективы развития // Ежегодник РАН. ИНИОН. 2013. Вып. 8, ч. 1. С. 609–617.

2. Космическая деятельность России на 2013–2020 годы : гос. программа Российской Федерации : утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 г. № 306. [Электронный ресурс]. URL: http://www.federalspace.ru/15/ (дата обращения: 05.11.2015).

3. Федеральная космическая программа России на 2006–2015 гг. : утв. Постановлением Правительства РФ от 22 октября 2005 г. № 635 (с приложениями 1–4). [Электронный ресурс]. URL: http://www.federalspace.ru/15/ (дата обращения: 05.11.2015).

4. Основные положения основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу : утв. Президентом Российской Федерации от 19.04.2013 г. № Пр-906. [Электронный ресурс]. URL: http://www.federalspace.ru/15/ (дата обращения: 05.11.2015).

5. Беляков Г. П. Интеграционные процессы в экономике: проблемы, поиски, решения. М. : Изд-во МАИ : Доброе слово, 2003. 244 с.

6. Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Состояние ракетно-космической промышленности и тенденции ее развития // Вестник СибГАУ. 2014. № 1 (53). С 207–211.

7. Беляков Г. П. Оборонно-промышленный комплекс: проблемы реформирования и развития : моногр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2003. 112 с.

8. Карачёва Г. А. Отечественный опыт реструктуризации предприятий оборонно-промышленного комплекса при создании корпоративных структур // Современные проблемы экономического и социального развития : межвуз. сб. науч. тр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2015. Вып.11. С. 26–29.

9. Schmitt B. From Cooperation to Integration: Defense and Aerospace Industries in Europe. Institute for Security Studies. Paris : Western European Union Publ., 2010. 94 p.

10. Hartung W. Prophets of War: Lockheed Martin and the Making of the Militari-Industrial Complex. New York : NationBooks Publ, 2011. 303 p.

11. Бауэр В. П., Ковков Дж. В., Московский А. М. Состояние и механизмы развития ракетно-космической промышленности России. М. : Ин-т экономики РАН, 2012. 53 с.

12. Информационное агентство ТС ВПК [Электронный ресурс]. URL: http://www.vpk.ru/cgi-bin/uis/w3.cgi/CMS/Item/2540013 (дата обращения: 28.10.2015).

13. ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosorkk.ru (дата обращения: 04.04.2015).

14. Авдонин Б. Н., Хрусталев Е. Ю. Методология организационно-экономического развития наукоемких производств. М. : Наука, 2010. 367 с.

15. Хрусталев Е. Ю. Методология инновационного развития российской экономики // Инновационное развитие российской экономики : материалы I Междунар. науч.-практич. конф. (2008, г. Москва). М. : МЭСИ, 2008. С. 440–444.

References

1. Murakaev I. M., Bochkarev K. M. [Russia: Trends and Prospects]. *Ezhegodnik RAN. INION.* 2013, No. 8, Part. 1, P. 609–617 (In Russ.).

2. State program of the Russian Federation "Space activities of Russia for 2013-2020" of April 15, 2014 № 306 (In Russ). Available at: http://www.federalspace.ru/15/ (accessed 05.11.2015).

3. Russian Federal Space Program for 2006–2015 of October 22, 2005 № 635 (In Russ.). Available at: http://www.federalspace.ru/15/ (accessed 05.11.2015).

4. The main provisions of the State Policy of the Russian Federation in the field of space activities for the period up to 2030 and beyond of April 19, 2013 № 906 (In Russ.). Available at: http://www.federalspace.ru/15/ (accessed 05.11.2015).

5. Belyakov G. P. *Integratsionnye protsessy v ekonomike: problemy, poiski, resheniya.* [Integration processes in the economy: problems, searches, solutions]. Moscow, MAI ; Dobroe slovo Publ., 2003, 244 p.

6. Erygina L. V., Serdyuk R. S. [Status rocket and space industry and its development trends]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 1(53), P. 207–211 (In Russ.).

7. Belyakov G. P. *Oboronno-promyshlennyy kompleks: Problemy reformirovaniya i razvitiya*. [Military-Industrial Complex: Problems of Reforming and Development]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2003, 112 p.

8. Karacheva G. A. *Otechestvennyy opyt restrukturizatsii predpriyatiy oboronno-promyshlennogo kompleksa pri sozdanii korporativnykh struktur* [The Russian experience of restructuring of enterprises of the military-industrial complex when creating corporate structures]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2015, 146 p.

9. Schmitt B. From Cooperation to Integration: Defense and Aerospace Industries in Europe. Institute for Security Studies. Paris, Western European Union Pabl., 2010, 94 p.

10. Hartung W. Prophets of War: Lockheed Martin and the Making of the Military-Industrial Complex. New York, NationBooks Pabl, 2011, 303 p.

11. Bauer V. P., Kovkov Dzh. V., Moskovskii A. M. *Sostoyanie i mekhanizmy razvitiya raketno-kosmicheskoy promyshlennosti Rossii* [Condition and mechanisms of development of rocket and space industry of Russia]. Moscow, In-t ekonomiki RAN Publ., 2012, 53 p.

12. *Informatsionnoe agentstvo TS VPK* [The news agency TS VPK]. Available at: http://www.vpk.ru/cgi-bin/uis/w3.cgi/CMS/Item/2540013 (accessed 28.10.2015).

13. *Integrated Rocket and Space Corporation* [JSC "United Rocket and Space Corporation"]. Available at: http://www.rosorkk.ru (accessed 04.04.2015).

14. Avdonin B. N., Khrustalev E. Yu. *Metodologiya organizatsionno-ekonomicheskogo razvitiya naukoemkikh proizvodstv* [Methodology of organizational and economic development of knowledge-intensive industries]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 367 p.

15. Khrustalev E. Yu. [Methodology innovative development of the Russian economy]. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii "Innovatsionnoe razvitie rossiiskoi ekonomiki"* [Proceedings of the Ist International scientific – practical conference "Innovative development of Russian economy"]. Moscow, 2008, P. 440–444 (In Russ.).

© Беляков Г. П., Карачёва Г. А., 2015

УДК 332.146.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 997–1006

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФОРМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ АДМИНИСТРАТИВНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЗАТО г. ЖЕЛЕЗНОГОРСК КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)

Г. Я. Белякова[1], Н. Т. Аврамчикова[2*], С. Д. Проскурнин[3]

[1]Сибирский федеральный университет, Институт управления бизнес-процессами и экономики
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[3]Администрация ЗАТО г. Железногорск Красноярского края
Российская Федерация, 662971, Красноярский край, г. Железногорск, ул. XXII партсъезда, 21
[*]E-mail: avr-777@yandex.ru

С позиций территориальной конкурентоспособности исследуются факторы, влияющие на инновационное развитие экономики территории, как условие их опережающего развития с учетом особенностей развития локальных административно-территориальных образований. Исследуются традиционные и новые тенденции, закономерности и организационно-правовые условия развития локальных административно-территориальных образований. Формулируется новый подход к обеспечению опережающего развития территории, показывается роль государства как субъекта управления и исследуются имеющиеся организационные формы управления развитием локальных административно-территориальных образований. Отмечаются особенности организации самоуправления закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО), раскрываются источники их финансирования и определяются условия трансформации отдельных ЗАТО в территории опережающего социально-экономического развития. Раскрывается необходимость установления особого правового режима осуществления предпринимательской деятельности в ЗАТО в целях формирования благоприятных условий для привлечения инвестиций, обеспечения ускоренного социально-экономического развития в соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации». При этом отмечается, что для повышения конкурентоспособности необходимо обеспечение достаточной экономической свободы и хозяйственной инициативы локальных административно-территориальных образований. Обосновывается необходимость разработки новых организационных форм управления развитием территорий, формируемых на основе экономической самостоятельности, построения системности импортозамещения и обеспечения инновационного развития, определяющих конкурентоспособность территории. Формулируются рекомендации по выбору мер региональной экономической политики, реализуемой с учетом принципов импортозамещения, обеспечения экономической самостоятельности территории, учета требований рынка, использования внутренних резервов территории. Это дает возможность обеспечить решение проблемы повышения эффективности экономики и конкурентоспособности локальных административно-территориальных образований.

Ключевые слова: локальное административно-территориальное образование, новые организационные формы управления, опережающее развитие закрытого административно-территориального образования, инновационное развитие закрытого административно-территориального образования.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 997–1006

ORGANIZATIONAL FORMS OF MANAGEMENT OF INNOVATIVE DEVELOPMENT OF LOCAL ADMINISTRATIVE-TERRITORIAL FORMATIONS (USING THE EXAMPLE OF CATU ZHELEZNOGORSK, KRASNOYARSK REGION)

G. Y. Belyakova[1], N. T. Avramchikova[2*], S. D. Proskurnin[3]

[1]Siberian Federal University
Institute of management of business processes and economics
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[3]Administration CATU Zheleznogorsk
21, XXII party Congress St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
*E-mail: avr-777@yandex.ru

In the article the factors influencing innovative development of the economy of the territory as the condition of their rapid development taking into account peculiarities of the development of local administrative-territorial entities are examined from positions of territorial competitiveness. Traditional and new trends, laws and legal conditions for the development of local administrative-territorial entities are explored. We formulate a new approach to achieve priority development areas, show the role of the state as a subject of management and examine existing organizational forms of the development management local administrative-territorial entities. The features of self-organization of closed administrative-territorial units (CATU) reveal the sources of their funding and determine conditions of transformation of the individual CATU in the territory of advancing socio-economic development (AASED). The need to establish a special legal regime of entrepreneurial activity of CATU in order to create favorable conditions for attracting investments, ensuring accelerated socio-economic development in accordance with the Federal law of December 29, 2014 № 473-FZ "About territories of advancing socio-economic development in the Russian Federation" is revealed. It is noted that for increasing the competitiveness it is necessary to ensure sufficient economic freedom and economic initiatives of local administrative-territorial entities. The rationale for the development of new organizational forms of management of development of territories, formed on the basis of economic autonomy, building systemic import substitution and innovative development that determine the competitiveness of the territory is considered. Some recommendations concerning the choice of measures of regional economic policy implemented in accordance with the principles of import substitution, to ensure economic independence of the territory, subject to the requirements of the market, the use of the internal resources of the territory are discussed. It gives the opportunity to provide a solution to the problem of increasing economic efficiency and competitiveness of local administrative-territorial entities.

Keywords: local administrative-territorial entity, the new organizational forms of management, the rapid development of closed administrative-territorial education, innovative development of the closed administrative-territorial formation.

Введение. В настоящее время инновационное развитие экономики Российской Федерации и ее административно-территориальных образований не в полной мере соответствует сложившимся мировым тенденциям формирования структуры экономики. Доля России в общем объеме мирового рынка наукоемкой продукции остается незначительной. Сложившаяся ситуация в инновационном развитии экономики страны обусловлена многими причинами, и одной из них является проблема низкой эффективности существующих форм организации управления инновационным развитием экономики локальных административно-территориальных образований. Определяя перспективы диверсификации экономики России в условиях кризиса международных отношений на мировом рынке, необходимо отметить наличие насущной потребности в развитии импортозамещения в ведущих отраслях отечественной промышленности, что обусловливает необходимость формирования новых форм организации управления инновационным развитием локальных административно-территориальных образований, обеспечивающих их опережающее развитие.

Организационные формы управления инновационным развитием локальных территориальных образований. Анализ отечественных и зарубежных разработок в области региональных исследований позволил авторам сделать вывод о том, что необходимым условием эффективности развития экономики локальных административно-территориальных образований является рациональная система организации управления их социально-экономическим развитием и опережающее развитие экономических анклавов, инновационная активность которых способствует разработке нововведений [1]. В настоящее время основными организационными формами управления инновационным развитием локальных территориальных образований являются:

1. Оффшорная зона. Ее основной особенностью являются пониженные ставки по налогам, стимулирующие ускоренный приток иностранных капиталов. В России широкого распространения данная организационная форма управления не получила. Это связано с тем, что пока не удается эффективно увязать на практике снижение налогов и на этой основе рост инвестиций. Имеющийся приток в оффшорные зоны налогоплательщиков из других регионов дает им определенные выгоды при одновременных потерях для этих регионов. Кроме того, оффшорные зоны стали местом «отмывания» нелегальных доходов.

2. Свободная экономическая зона. Свободная экономическая зона (СЭЗ) – это ограниченный участок территории, в пределах которого устанавливается особый режим предпринимательской деятельности для коммерческих организаций, зарегистрированных в данной зоне. СЭЗ создается главным образом для привлечения иностранного капитала, передовых технологий, развития экспортного потенциала.

СЭЗ подразделяются на следующие типы:

– зоны экспортного производства – участники зоны вывозят за пределы страны более 50 % товаров своего производства (продукция обрабатывающих отраслей);

– свободные таможенные зоны производственного типа – создаются в местах с развитой производственной и транспортной инфраструктурой или другими благоприятными условиями;

– зоны торгового типа – создаются в портах, на железнодорожных узлах, в аэропортах и других пунктах, через которые регулярно перевозятся экспортно-импортные грузы;

– другие зоны – технико-внедренческие, трансграничного оказания услуг и др.

Решение о создании СЭЗ принимается Правительством РФ, им же утверждается положение о свободной экономической зоне.

В СЭЗ для иностранных инвесторов и предприятий устанавливается льготный налоговый режим, пониженные ставки платы за землю и природные ресурсы, особый таможенный режим, упрощенный порядок въезда и выезда граждан, регистрации предприятия. В федеральном бюджете в составе целевых средств по оказанию финансовой поддержки регионам учитываются средства, направляемые на обеспечение функционирования СЭЗ.

Согласно западным стандартам для обустройства 1 км^2 экспортно-производящей зоны требуется 40–45 млн долл. Поэтому большая часть производственных зон ограничена пределами предприятий и производственных комплексов вблизи городов, обеспеченных объектами инфраструктуры и рынков сбыта; площадь промышленно-производственной зоны обычно составляет не более 10 км^2. Зоны, представляющие город или район, встречаются редко. В основном это небольшие участки, где выгодно заниматься предпринимательством.

3. Особая экономическая зона. В отдаленных и находящихся в специфических геополитических условиях регионах осуществляется государственное управление в режиме особой экономической зоны (ОЭЗ). Полномочия по вопросам функционирования ОЭЗ осуществляют органы представительной и исполнительной власти субъекта РФ, администрация субъекта РФ выполняет функции администрации ОЭЗ.

В ОЭЗ устанавливается льготный режим инвестиций и предпринимательской деятельности, в том числе внешнеэкономической. Администрация ОЭЗ вправе проводить прямые переговоры с российскими и иностранными инвесторами и предпринимателями для заключения договоров по реализации зональных инвестиционных проектов.

Уполномоченные органы субъекта РФ, на территории которого образована ОЭЗ, вправе заключать соглашения об экономическом, научно-техническом, культурном и спортивном сотрудничестве со штатами, провинциями, землями и другими административно-территориальными образованиями иностранных государств, которые, однако, не могут рассматриваться как международные договоры РФ.

В отношении взимания таможенных пошлин и иных платежей, в том числе налогов, уплачиваемых при таможенном оформлении ввозимых и вывозимых товаров, ОЭЗ рассматривается как находящаяся в режиме свободной таможенной зоны.

Землепользование иностранным юридическим и физическим лицам на территории ОЭЗ предоставляется на основании договоров аренды без права выкупа. В особой экономической зоне не требуется лицензирование предпринимательской деятельности, за исключением случаев, предусмотренных законодательством.

Создание ОЭЗ не должно сводиться к получению дополнительных льгот, когда благополучие достигается за счет недоплат другим регионам. Нередко предприниматели регистрируются в ОЭЗ, а производственно-финансовую деятельность ведут в другом регионе.

Оценивая перспективы ОЭЗ в России, нужно учитывать, что их основное назначение – быть островами экономической свободы – потеряло актуальность. Вся Россия является экономически свободной страной. Правительство взяло курс на создание особых экономических зон с учетом современных требований. Основными их типами являются: промышленно-производственные, технико-внедренческие, портовые, туристско-рекреационные. ОЭЗ создаются на основе конкурсов, которые объявляются среди регионов. Особые условия следует создавать там, где это еще необходимо, например, для развития фундаментальной, прикладной науки и технического прогресса.

4. Наукоград. В последние годы появилась новая форма территориального управления хозяйством – наукограды, представляющие особое муниципальное образование, в котором градообразующую роль играет научно-производственный комплекс. Такой статус муниципальному образованию присваивается специальным решением Правительства РФ, в соответствии с которым разрабатывается и утверждается федеральная целевая программа, а на ее основании осуществляется поддержка развития наукограда. В программе органически объединяются все основные звенья комплекса: научная, научно-техническая, инновационная деятельность, экспериментальные разработки, подготовка кадров.

Статус наукограда присваивается указом Президента РФ в целях создания условий для развития научно-технического потенциала с определением приоритетных научных направлений. Наукоград – это муниципальное образование со статусом городского округа, имеющее высокий научно-технический потенциал, с градообразующим научно-производственным комплексом (НПК). Статус наукограда подтверждается следующими критериями:

– не менее 15 % работающих муниципального образования заняты в научно-производственном комплексе;

– не менее 50 % всей продукции хозяйствующих субъектов муниципального образования по стоимости произведено в НПК;

– не менее 50 % всех основных фондов хозяйствующих субъектов муниципального образования (кроме ЖКХ и объектов социальной сферы) принадлежит НПК.

В НПК входят производственные организации, у которых доля наукоемкой продукции в предыдущие три года составляет не менее 50 %, а также зарегистрированные научные организации, вузы, инновационные, экспериментальные организации.

В настоящее время статус наукограда Российской Федерации имеют следующие муниципальные образования: г. Обнинск Калужской области, города Королев, Дубна, Реутов, Фрязино Московской области, п. Кольцово Новосибирской области, г. Мичуринск Тамбовской области.

Наукограды призваны быть опорными точками развития приоритетных направлений науки и техники. В наукограде государство берет под защиту определенную территорию, оказывает государственную поддержку и гарантирует востребованность научной продукции, что нужно не столько данному городу, сколько всей стране. В наукограде выделяются два направления деятельности:

– решение научных проблем федерального уровня, которое оплачивается государством и не связано с производством города;

– создание инновационных фирм научно-технической ориентации, которые призваны обеспечивать основную часть поступлений в бюджет города.

Управление наукой остается прерогативой государства (Российской академии наук). Правительство РФ определяет приоритетные направления научной и инновационной деятельности наукограда, а также программу развития города в качестве наукограда, где применяется территориальный, а не отраслевой подход к управлению. Используются новые формы управления: городские научно-технические советы, венчурные фонды. Организуются комплексные исследования нескольких крупных научно-исследовательских институтов, учреждения РАН обеспечивают технологические решения и производство научного продукта.

Городское самоуправление создает условия для развития научного творчества, поддерживает на должном уровне социальную сферу. Для финансирования конкретных проектов заключаются соглашения. Научные организации освобождены почти от всех налогов, поступления от них в местный бюджет незначительны, поэтому наукограды были и остаются дотационными. По различным оценкам в стране 69 муниципальных образований, которые могут стать наукоградами, в них проживает 2,5 млн чел.

5. Закрытое административно-территориальное образование. Закрытым административно-территориальным образованием является территориальное образование, в пределах которого расположены промышленные предприятия по разработке, хранению и утилизации оружия массового поражения, переработке радиоактивных и других материалов, военные и иные объекты, для которых устанавливается особый режим безопасного функционирования и охраны государственной тайны, включая специальные условия проживания граждан.

Интересы государства требуют создания в определенных регионах закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО). Порядок их функционирования определен Законом «О закрытом административно-территориальном образовании» № 144-ФЗ, с изменениями и дополнениями от 28 ноября 1995 г.

К основным особенностям организации самоуправления ЗАТО относятся следующие положения:

1) ЗАТО наделяется статусом городского округа;

2) решение о создании (упразднении) ЗАТО принимается Президентом РФ;

3) при принятии решения об упразднении ЗАТО определяются этапность и сроки снятия особого режима безопасного функционирования предприятий и объектов (ст. 2 п. 2 закона о ЗАТО);

4) ЗАТО находится в ведении федеральных органов государственной власти по вопросам:

– установления административной подчиненности, границ указанного образования и земель, отводимых предприятиям и объектам;

– определения полномочий органов государственной власти субъектов РФ в отношении указанного образования;

– обеспечения особого режима безопасного функционирования предприятий и объектов, включающего специальные условия проживания граждан, охраны общественного порядка и обеспечения противопожарной безопасности; все решения по вышеуказанным вопросам принимаются Правительством РФ (ст. 1 закона о ЗАТО);

5) устанавливаются ограничения на право ведения хозяйственной и предпринимательской деятельности, владения, пользования и распоряжения землей, природными ресурсами, недвижимым имуществом;

6) в бюджет ЗАТО зачисляются все налоги и сборы, полученные с этой территории;

7) земли ЗАТО находятся в ведении муниципального образования, за исключением земель федеральной собственности;

8) участие в приватизации муниципального имущества принимают только те граждане, кто постоянно там проживает и зарегистрирован;

9) компетенция органов местного самоуправления ЗАТО расширена; к ним относятся:

а) вопросы обеспечения безопасности граждан;

б) вопросы безопасности в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций;

в) проблемы соблюдения особого режима территории;

г) вопросы участия в режимном процессе (пропуск) и т. п;

10) проживание или работа граждан в условиях особого режима ЗАТО подлежат общей социальной компенсации, которая включает повышенный уровень бюджетной обеспеченности населения, меры социальной защиты, льготы в оплате труда, государственное страхование и гарантии; меры общей социальной компенсации устанавливаются федеральными законами, а также решениями Правительства РФ.

Закрытые административно-территориальные образования функционируют в городах и поселках, в которых находятся объекты Министерства обороны и Федерального агентства по атомной энергии с особым режимом деятельности. Таких населенных пунктов в России насчитывается около сорока, и находятся они в 21 субъекте Российской Федерации. Их границы могут не вписываться в существующее административно-территориальное деление. Все они имеют органы местного самоуправления и располагают особой системой финансирования и социальной поддержки населения.

Изначально ЗАТО создавались для поддержки оборонных предприятий и военной науки. В настоящее время тридцать ЗАТО находятся в системе Минобороны России. Деятельность федеральных органов, связанную с функционированием ЗАТО, координирует Минэкономразвития России. Некоторые ЗАТО являются

по существу наукоградами, хотя и не имеют этого статуса. В ЗАТО сосредоточены уникальные кадры ученых и инженеров, имеется высокая техническая оснащенность, существуют возможности творческого роста.

Земли, занимаемые предприятиями, по виду деятельности которых создано ЗАТО, находятся в федеральной собственности и передаются предприятиям в постоянное (бессрочное) пользование. Создание на территории ЗАТО предприятий с иностранными инвестициями допускается по решению органов местного самоуправления, согласованному с Правительством РФ. В ЗАТО поддерживается порядок обеспечения особого режима безопасности предприятий и объектов.

Предприятия, выполняющие государственный оборонный заказ, имеют возможность производить отчисления в бюджет ЗАТО для дополнительного финансирования программ по экологии и здравоохранению в размере 1 % от объема финансирования. Налоговые и иные поступления от юридических лиц, находящихся в границах ЗАТО, направляются в местный бюджет. Эти средства используются на создание новых рабочих мест, социальное развитие, инфраструктуру, экологию, на уменьшение дотаций из федерального бюджета.

Закрытым административно-территориальном образованиям с учетом финансирования дополнительных расходов, связанных с особым режимом безопасного функционирования, выделяются компенсации, дефицит их бюджета покрывается за счет средств федерального бюджета. Межбюджетные трансферты обеспечивают меры социальной защиты населения в условиях ограничения права ведения хозяйственной деятельности, владения, пользования и распоряжения землей, природными ресурсами, недвижимым имуществом. Все вопросы деятельности ЗАТО, кроме находящихся в ведении федеральных органов и органов местного самоуправления, решаются администрацией субъекта РФ.

6. Территория опережающего социально-экономического развития. Согласно Федеральному закону от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» с 1 января 2015 года в России создаются особые площадки развития для инвесторов с существенными налоговыми и административными преференциями. Пилотным регионом для создания территорий опережающего социально-экономического развития (ТОСЭР) станет Дальний Восток. Закон определяет территорию опережающего социально-экономического развития как часть территории субъекта Российской Федерации, на которой, в соответствии с решением Правительства РФ, установлен особый правовой режим осуществления предпринимательской и иной деятельности в целях формирования благоприятных условий для привлечения инвестиций, обеспечения ускоренного социально-экономического развития и создания комфортных условий для обеспечения жизнедеятельности населения. Установление статуса ТОСЭР определено также Правительством РФ в моногородах в рамках Госкопорации «Росатом» уже в текущем году. Таким образом, под территорией опережающего социально-экономического развития понимается территория субъектов Дальневосточного федерального округа и отдельных территорий РФ – муниципальных образований – моногородов Госкорпорации «Росатом», на которых в соответствии с решением Правительства РФ в целях развития установлены особые правовые режимы осуществления предпринимательской и иной деятельности [2; 3].

Финансирование создания инфраструктуры ТОСЭР осуществляется за счет средств бюджетов федерального, регионального и местного уровней, внебюджетных источников, а также иных источников финансирования. Для мониторинга работы территории опережающего развития создается наблюдательный совет, куда в том числе входят представители всех уровней власти и представители профсоюзов, которые, среди прочего, участвуют в решении вопросов привлечения иностранных специалистов. Согласно данному нормативно-правовому акту государственная поддержка осуществляется путем создания и установления особых правовых режимов осуществления предпринимательской и иной деятельности на таких территориях.

Финансовые инструменты регулирования деятельности ТОСЭР определены федеральным законом от 29 ноября 2014 г. № 380-ФЗ «О внесении изменений в часть вторую Налогового кодекса Российской Федерации» в связи с принятием вышеназванного федерального закона. Основными из них являются:

– субсидиарное финансирование деятельности ТОСЭР из средств бюджетов федерального, регионального и местного уровней, а также внебюджетных источников;

– установление пониженной налоговой ставки налога на прибыль, подлежащей зачислению в бюджеты субъектов Российской Федерации, от деятельности, осуществляемой при исполнении соглашения об осуществлении деятельности на территории опережающего социально-экономического развития при выполнении ими определенных условий;

– отсрочка в сроках начисления налогов в случае, если налогоплательщик – резидент территории опережающего социально-экономического развития – не получил прибыль от деятельности в течение трех налоговых периодов, начиная с налогового периода, в котором он был включен в реестр резидентов территории опережающего социально-экономического развития;

– установление размера налоговой ставки налога, подлежащего зачислению в бюджеты субъектов РФ, не превышающей 5 % в течение пяти налоговых периодов, начиная с налогового периода, в котором в соответствии с данными налогового учета была получена первая прибыль от деятельности, осуществляемой при исполнении соглашений об осуществлении деятельности на территории опережающего социально-экономического развития; следующие пять налоговых периодов данная ставка должна быть не менее 10 %.

В настоящий момент внесены изменения в Федеральный закон от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ (ред. от 13.07.2015 № 213-ФЗ), в соответствии с которыми на территориях ЗАТО ТОСЭР могут создаваться, начиная с 1 января 2016 года.

В целях создания и обеспечения конкурентных условий деятельности территорий опережающего социально-экономического развития предполагается использование международного опыта деятельности наиболее успешных аналогичных территорий в странах Азиатско-Тихоокеанского региона, таких как Южная Корея, Китай, Сингапур. Функционирующие на территории указанных государств особые территории действуют, как правило, на основании отдельного правового акта высшей юридической силы, который содержит существенные изъятия из общих правил регулирования в сфере земельных отношений, предпринимательской, инвестиционной деятельности, налоговых, таможенных режимов и т. д. [4; 5].

В основе правового регулирования создания и функционирования территорий опережающего социально-экономического развития был использован аналогичный лучшим российским и международным практикам подход.

Современные тенденции развития локальных административно-территориальных образований. Развитие инновационной экономики для России крайне актуально, так как Россия в развитии собственной экономики отстала от ведущих стран на 1–2 уклада (пятый-шестой уклад в развитых странах и преимущественно третий-четвертый – в России). Так, в экономиках развитых стран доминируют биотехнологии, нанотехнологии, информация и т. д., в то время как отечественная экономика находится все еще на индустриальной стадии. Если такое положение сохранится, то разрыв в экономическом развитии будет неизбежно нарастать, и Россия может оказаться на второстепенных ролях в мировой структуре распределения труда. Уже сейчас в развитых странах мира 75–90 % прироста ВВП обеспечиваются за счет роста инновационного сектора, а в России пока данный показатель по оценкам экспертов находится только на уровне 10 %, что негативно сказывается на общей эффективности экономики. Так, по существующим последним оценкам упущенная выгода России от инновационного отставания составляет 1214 млрд долл. в год [6; 7].

Для экономики России характерна неравномерность концентрации экономического пространства и очаговое развитие экономики [8]. В этих специфических условиях важная роль в инновационном развитии национальной экономики отводится локальным административно-территориальным образованиям и, в частности, закрытым административно-территориальным образованиям. Именно в этих структурах (а также в наукоградах) сосредоточены передовые и прорывные технологические инновации, и эффективность их экономики во многом определяет конкурентоспособность России в целом на мировых рынках.

Основные показатели источников финансирования экономики ЗАТО, подконтрольных Госкорпорации «Росатом», характеризуются данными, представленными в таблице.

Анализ источников финансирования инновационной деятельности ЗАТО свидетельствует о том, что все ЗАТО являются высокодотационными и дотируются из средств федерального бюджета, при этом объемы инвестиций извне территории в крупные компании соизмеримы или превышают размеры бюджетов ЗАТО.

Основные показатели источников финансирования экономики ЗАТО, подконтрольных ГК «Росатом», в 2014 г.*

№ п\п	Наименование ЗАТО	Субъект РФ	Среднегодовая численность населения, тыс. чел.	Объем инвестиций за счет всех источников финансирования, млн руб.	Параметры местного бюджета, млн руб.		
					Доходы	Расходы	Дотация из федерального бюджета
1	Железногорск	Красноярский край	94,2	11032,6	5330,0	5328,1	1075,5
2	Зеленогорск	Красноярский край	63,9	1260,3	2314,3	2385,6	577,4
3	Саров	Нижегородская область	94,2	2330,8	3100,9	3183,0	618,9
4	Заречный	Пензенская область	64,5	1405,8	2281,6	2326,0	1262,4
5	Лесной	Свердловская область	51,5	743,5	2004,2	2233,8	132,0
6	Новоуральск	Свердловская область	85,6	5800,0	4518,5	3551,8	518,2
7	Северск	Томская область	115,2	2498,0	3810,0	3888,4	969,4
8	Озерск	Челябинская область	90,6	6002,2	3029,0	3166,4	583,3
9	Снежинск	Челябинская область	50,0	–	2108,4	2118,3	542,6
10	Трехгорный	Челябинская область	32,7	1730,0	919,5	1147,3	269,0

*Источник – данные ГК «Росатом».

В ходе работы авторами исследовано состояние экономики ЗАТО г. Железногорск Красноярского края, который динамично развивается и является крупным инновационным кластером Красноярского края и России [2].

Развитие в Красноярском крае кластера инновационных технологий ЗАТО г. Железногорск осуществляется с целью повышения технологической конкурентоспособности существующего бизнеса и предприятий ядерной и космической отрасли. Градообразующие предприятия ЗАТО г. Железногорск – ФГУП «Горно-химический комбинат» и ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» – формируют ядро данного кластера. В Красноярском крае разработана программа развития кластера как центра инновационного развития, определено его взаимодействие с партнерами, способствующее активизации распространения инноваций. В результате реализации программы развития кластера ожидается рост валового территориального продукта ЗАТО г. Железногорска с 32 млрд руб. в 2014 г. до 70 млрд руб. – к 2020 г.

В Железногорске выпускается 70 % российских спутников гражданского назначения, создана мощная производственная база для промышленного и гражданского строительства, а основными направлениями деятельности являются развитие ядерных и космических технологий.

Цель кластера – создание инновационной территории, способной усиливать «ядра» кластера, способствуя их развитию и обеспечению глобальной конкурентоспособности, и создавать инновационные бизнесы вокруг «ядер» кластера г. Железногорска.

Наличие градообразующего предприятия ФГУП «Горно-химический комбинат» ГК «Росатом» обосновывает получение ЗАТО статуса территории опережающего социально-экономического развития в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации».

Локальные административно-территориальные образования типа ЗАТО благодаря активному финансированию и поддержке государства определяют инновационное развитие отечественной экономики. В то же время все существующие организационные формы управления их инновационным развитием созданы и продолжают развиваться по инициативе органов государственного управления, что не способствует формированию их экономической самостоятельности и мотивов к изысканию внутренних резервов инновационного развития, определяемых рыночной ситуацией. При этом большинство проблем в инновационном развитии РФ и ее региональных социально-экономических систем связаны с локализацией инновационных процессов и недостаточно развитой инновационной инфраструктурой. Данная ситуация в последнее время осложнена ограничением доступа российского бизнеса к мировым рынкам, в связи с чем для полноценного обеспечения отечественного производства сырьем и товарами необходимо развивать систему импортозамещения [9].

Необходимо отметить, что формирование закрытых городов в советское время было продиктовано не только режимами безопасности, но и предполагало технологический передел продукции. Каждое из предприятий изготавливало продукт, который был исходным продуктом для следующего этапа передела в другом ЗАТО. На том этапе развития общества доминировало создание полного цикла товаров и сырья для создания оборонной продукции. В настоящее время цикл советского производства продукции разрушен.

В рамках программы развития инновационного кластера «ЗАТО г. Железногорск» наметилась тенденция по созданию цепочек добавленной стоимости между предприятиями атомной и космической отрасли, что невозможно было сделать в советское время, так как кооперация была возможна только в рамках одной отрасли, т. е. вертикально. Создание в ЗАТО г. Железногорск площадки территориального инновационного кластера и профессиональной среды разработчиков позволило компетенции одного предприятия использовать в рамках другого и выстроить горизонтальные связи. Реализация данных проектов стала возможной в рамках формирования программ импортозамещения продукции. Так, в ЗАТО г. Железногорск наглядным примером является разработка бетавольтаической батареи – продукта созданного из компетенций атомной отрасли, его производство поддержано инженерными разработками АО «ИСС».

В этой связи требуют анализа и совершенствования существующие организационные формы и методы управления инновационным развитием на региональном уровне, которые должны соответствовать принятой в мировой и отечественной практике системе управления с учетом особенностей и специфики инновационного развития локальных социально-экономических систем РФ. Проведенный анализ обосновывает необходимость разработки новой системы взглядов, дополняющей научную концепцию управления инновационным развитием локальных административно-территориальных образований в условиях неравномерности развития экономики и позволяющей выявить качественно новые закономерности их инновационного развития с учетом использования системности в формировании организационных структур, обеспечивающих активизацию инновационных процессов и процессов импортозамещения [10; 11].

Перспективы инновационного развития и импортозамещения. Формирование инновационной экономики идет по пути импортозамещения инновационной продукции на внутреннем рынке страны и ее экспортоориентации на внешних рынках. При этом инновационная продукция, техника, новые материалы, технологии в медицине, образовании и т. д. аккумулируют новые знания, использование которых в производстве позволяет экономить сырье, основной и человеческий капитал, повышать качество жизни людей. Развитие импортозамещающих производств предполагает восстановление конкурентоспособности российской продукции на внутреннем рынке. В отличие от этого рост экспортно ориентированного производства базируется на внешнеэкономической торговой

экспансии на рынки других стран. Общим условием является повышение конкурентоспособности продукции в области качества и цены до уровня требований конкретного странового рынка.

Импортоориентированный путь структурно-технологической модернизации имеет как позитивные, так и негативные последствия. Позитивные последствия – ликвидация технического отставания, рост качества продукции, производительности труда, энергосбережения в отраслях – пользователях техники. Негативные последствия – кризис и сокращение производства отечественного оборудования, увеличение нагрузки на добычу нефти и газа, на сырьевой экспорт минералов, а также потеря научно-технических компетенций, так как прикладные (отраслевые) НИОКР в отраслях машиностроения свертываются. В группу импортозамещающих производств могут быть отнесены российские товары, имеющие значительный по объемам импорт, но располагающие дополнительными возможностями для его конкурентного вытеснения и восстановления господствующих позиций на внутреннем рынке [12]. К таким видам производств, по мнению авторитетных ученых, могут быть отнесены:

1. Авиационная промышленность. Экспорт российской авиатехники – это преимущественно продукция военного назначения: истребители, вертолеты и др. В импорте преобладают летательные аппараты гражданского назначения. Российский авиапром практически вытеснен с внутреннего рынка авиатехники: на его долю приходится всего около 4-х % российского пассажирооборота. Российский авиапром – один из самых крупных из десятка стран, имеющих развитое самолетостроение.

2. Судостроительная промышленность. В мировом военном кораблестроении Россия занимает 2-е место после США и производит 12 % всей продукции судостроения. По объемам гражданского судостроения Россия занимает 21-е место в мире. Объектом импорта судостроительной промышленности преимущественно является продукция гражданского судостроения, а экспорта – суда оборонного назначения, в том числе подводные лодки. Возможности для будущего импортозамещения и развития экспорта открывает увеличение производства в судпроме конкурентоспособной продукции гражданского назначения.

3. Автопром. Возможности импортозамещения поставок легковых автомобилей являются в России очень большими, а перспективы российского автопрома предусматривают развитие производства иномарок. Догоняющий тип развития отечественного автопрома путем создания сборочных предприятий имеет преимущество по сравнению с импортом, так как позволяет создать новые рабочие места, использовать российскую электроэнергию, металл и постепенно локализовать производство с использованием российских комплектующих деталей. Однако как импорт иномарок, так и их сборочное производство в России будут вызывать свертывание брендов российских автогигантов, о чем, в частности, свидетельствует низкий уровень коэффициента использования их производственных мощностей. Развитие экспортно ориентированных производств предполагает экспансию на рынки стран ближнего и дальнего зарубежья.

Из отраслей обрабатывающей промышленности значительным опытом экспорта продукции располагают оборонная, атомная промышленность и газонефтехимия.

1. Оборонная промышленность. В настоящее время многие виды отечественных вооружений находятся на самом высоком мировом уровне. Сюда относятся межконтинентальные ракеты и ракетные комплексы, атомные подводные лодки, российские истребители, новые боевые вертолеты и др. Мировой рынок свидетельствует о высокой конкурентоспособности российской оборонной промышленности, позволяющей прогнозировать возможность обеспечения оборонной достаточности страны, практически не прибегая к импорту вооружений. При этом развитие оборонной промышленности отразится на росте инновационного потенциала смежных отраслей и производств.

2. Атомная энергетика. Россия – один из мировых лидеров по проектированию, сооружению и эксплуатации АЭС, обогащению и поставкам ядерного топлива. В настоящее время в России и за рубежом Госкорпорация «Росатом» строит 15 АЭС. ГК «Росатом» принадлежит 40 % мирового рынка услуг по обогащению урана, 17 % ядерного топлива.

3. Газонефтехимия. Газонефтехимическая промышленность России характеризуется достаточно высоким уровнем конкурентоспособности своей продукции на мировом рынке.

Рассмотренные области инновационных прорывов далеко не исчерпывают всех возможных направлений инновационного лидерства. Если нормативно подойти к желаемым инновационным прорывам, то в их перечень можно добавить продукцию биотехнологий, композитные материалы, бытовую электронику, компьютеры и планшеты, нанотехнологии, робототехнику, технику мобильной связи, лекарства, сложную медтехнику и многие другие инновационные продукты, потребности в которых сейчас в значительной степени удовлетворяются импортом. Каждая инновация, прежде чем стать объектом промышленной политики, вначале должна успешно пройти все стадии научно-технической политики. Конкурентоспособность новой продукции должна быть доказана на докоммерческой стадии вначале в ходе испытаний, демонстрационных или опытных образцов продукции, а вслед за тем получить признание на мировом рынке. Только после подтверждения конкурентоспособности и спроса на внутреннем и внешних рынках эта продукция может стать приоритетом промышленной политики. Можно утверждать, что развитие конкурентоспособного производства гражданских самолетов и судов, сборочного производства легковых иномарок с последующей его локализацией, экспорта современных вооружений, объектов атомной энергетики, продукции газонефтехимии существенно укрепит лидерские позиции России в мировой инновационной системе [13].

Практическая реализация приоритетов промышленной и научно-технической политики существенно

увеличит инновационный элемент российской экономики. Для реализации поставленной задачи необходим новый подход к формированию новых организационных форм импортозамещения, развитию импортозамещающих производств и выбору мер региональной экономической политики, направленных на обеспечение экономической самостоятельности локальных административно-территориальных образований как самостоятельных субъектов рынка.

Выделив основные направления импортозамещения для российской экономики, необходимо определить направления совершенствования государственной политики, регулирующей данный процесс [14]. Для того чтобы производитель начал долгосрочно инвестировать (в том числе и кредитные ресурсы) в развитие традиционного производства и производство инновационной продукции, должны соблюдаться следующие условия:

– должна быть сформулирована государственная стратегия развития импортозамещения, не только заявленная, но и исполняемая органами государственной власти, выражающаяся как в мониторингах и аналитике, так и реальных материально-финансовых потоках, которые овеществляют государственную поддержку конкретных импортозамещающих отраслей и производств;

– должен быть обеспечен доступный внутренний кредит по приемлемым ставкам (здесь могут сыграть важную роль господдержка в плане субсидий на финансирование части процентных платежей и активная процентная политика регулятора), в необходимых объемах и на достаточно длительные сроки;

– должна быть реализована государственная политика, направленная на облегчение поиска новых внешних источников сырья, полупродуктов и готовых изделий, необходимых для развития импортозамещающего производства на начальном этапе, в виде новых межправительственных соглашений (или изменения условий действующих) со странами, не вошедшими в систему санкций, и т. д.;

– производитель должен быть уверен в долгосрочном характере государственной политики; без этой уверенности никакие инструменты поддержки бизнеса, ориентированного на внутреннее потребление, не будут работать.

Данная политика должна строиться с учетом принципов импортозамещения, инновационной модернизации, разработки и производства прорывных инноваций, развития инфраструктуры по коммерциализации инноваций, учета их востребованности на рынке, использования внутренних резервов [15].

Заключение. Решение поставленных задач возможно при обеспечении достаточной экономической самостоятельности существующих локальных административно-территориальных образований, определяющих инновационность развития отечественной экономики. Однако рассматривая механизм функционирования последней из существующих организационных форм управления (ТОСЭР) в рамках существующих межбюджетных отношений РФ, необходимо отметить, что данная организационная форма также не обеспечивает хозяйственную и финансовую самостоятельность территорий и не формирует систему мотивации для изыскания внутренних резервов ее развития.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы.

1. Разнообразие организационных форм управления локальными территориальными образованиями обусловлено различием исторических, политических, экономических, социальных и природных предпосылок в различных регионах Российской Федерации.

2. Отказ от административно-командного управления во многом предопределил сущность и организационные формы управления в условиях экономических (рыночных) методов хозяйствования.

3. Существующие организационные формы управления инновационным развитием локальных территориальных образований, включая последние (ТОСЭР), не обеспечивают экономической самостоятельности как регионов (субъектов Федерации) в целом, так и входящих в их состав отдельных локальных административно-территориальных образований, так как основным финансовым механизмом регулирования межбюджетных отношений остается предоставление финансовой помощи через межбюджетные отношения, сглаживающее социально-экономические различия между регионами и способствующее выравниванию и ускорению хозяйственного развития. Особенности проводимой региональной бюджетной политики обусловливают потоки финансовых ресурсов из центра в регионы и способствуют концентрации финансовых средств в государственном (федеральном) бюджете, тогда как местные бюджеты остаются, как правило, дотационными.

4. Региональная социально-экономическая система имеет внутренние резервы или «невидимые активы», которые необходимо мобилизовать для решения поставленных на современном этапе задач, связанных с диверсификацией отечественной экономики, инновационным развитием и импортозамещением.

Новизна предлагаемого подхода к управлению инновационным развитием территорий состоит в разработке авторами условий, его определяющих, а именно:

– для динамичного развития отечественной экономики и преобразования ее структуры необходимо обеспечение опережающего развития локальных административно-территориальных образований, в том числе ЗАТО;

– установление особого правового режима осуществления предпринимательской деятельности в целях формирования благоприятных условий для привлечения инвестиций, обеспечения ускоренного социально-экономического развития в соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2014 г. № 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» должно сопровождаться обеспечением достаточной экономической свободы и хозяйственной инициативы локальных административно-территориальных образований;

– создание новых организационных (или корректировки существующих) форм управления инновационным развитием территорий, формируемых на основе построения системности импортозамещения,

позволит обеспечить решение проблемы повышения эффективности экономики и конкурентоспособности локального административно-территориального образования и отечественной экономики в целом.

Библиографические ссылки

1. Балакина Г. Ф., Поподько Г. И., Нагаева О. С. Модель организации зоны особого социоэкологического режима природопользования для развития депрессивных регионов // Региональная экономика: теория и практика. 2015. № 10(385). С. 37–46.

2. Сайт администрации г. Железногорска Красноярского края [Электронный ресурс]. URL: www.admk26.ru (дата обращения: 31.07.2015).

3. Сергушко С. В., Славянов А. С. Модернизация институциональной системы государственного управления инновационным развитием региона // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 30 (357). С. 10–17.

4. Новоселов А. С., Маршалова А. С. Инновационный подход к региональному и муниципальному управлению // Регион: экономика и социология. 2015. № 1. С. 55–78.

5. Hodgson G. M. Economics and Systems Theory // Journal of Economic Studies. 1987. Vol. 14, № 4. P. 65–86.

6. Халимова С. Р. Оценка российских регионов по уровню инновационного развития // Регион: экономика и социология. 2015. № 2. С. 150–174.

7. Кирилловская А. А. Теория и практика экономической политики: современные проблемы и оценка конкурентной позиции // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 32(359). С. 19–26.

8. Аврамчикова Н. Т., Чувашова М. Н. Инструменты оценки технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона // Вестник СибГАУ. 2014. Вып. 1(53). С. 186–189.

9. Хандажапова Л. М., Лубсанова Н. Б. Проблемы обеспечения инновационной безопасности региона // Региональная экономика: теория и практика. 2015. № 15(390). С. 13–21.

10. Мальцева А. А. Методика оценки потенциала региона для создания территорий инновационного развития // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 29(356). С. 33–48.

11. Roberts B., Murray A. National and regional corporate spatial structure // The Annals of Regional Science. 2002. № 36. P. 347–368.

12. Хасанов Р. Х. К вопросу о понятии «региональная конкурентоспособность» // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 25(352). С. 19–25.

13. Aslund A. How Russia became a market economy. Washington D.C. : The Brookings Institution, 1995.

14. Мальцева А. А., Дорофеева Н. С. Территории инновационного развития: аспекты социально-гуманитарного проектирования на основе функционального подхода // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 25(352) С. 33–39.

15. Perez C. Finance and technical change: a long-term view. Cheltenham : Edward Elgar, 2004. 18 p.

References

1. Balakina G. F., Popadic G. I. Nagaev, O. S. [Model of the organization of areas of special ecological and social resource use for development of depressed regions]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2015, No. 10(385), P. 37–46 (In Russ.).

2. *Sayt administratsii g. Zheleznogorska Krasnoyarskogo kraya* [The website of the administration of Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region]. Available at: www.admk26.ru (accessed 31.07.2015).

3. Sanguszko S. V. Slavyanov A. S. [Modernization of the institutional system of state management of innovative development of the region]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2014, No. 30(357), P. 10–17 (In Russ.).

4. Novoselov A. S., Marshalova A. S. [Innovative approach to regional and municipal management]. *Region: ekonomika i sotsiologiya.* 2015, No. 1, P. 55–78 (In Russ.).

5. Hodgson G. M. Economics and Systems Theory. *Journal of Economic Studies*. 1987, Vol. 14, No. 4, P. 65–86.

6. Khalimova S. R. [Assessment of Russian regions by the level of innovative development]. *Region: ekonomika i sotsiologiya.* 2015, No. 2, P. 150–174 (In Russ.).

7. Kirillovskaya A. A. [Theory and practice of economic policy: modern challenges and assessment of competitive position]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2014, No. 32(359), P. 19–26 (In Russ.).

8. Avrachenkov N. T., Chuvashov M. N. [Tools for the assessment of technology status of the industries of resource-based region]. *SibGAU.* 2014, No. 1(53), P. 186–189 (In Russ.).

9. Khandazhapova L. M., Lubsanova N. B. [The problem of providing innovative security of the region]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2015, No. 15(390), P. 13–21 (In Russ.).

10. Mal'tseva A. A. [Methods of assessment of the capacity of the region to create territories of innovative development]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika*. 2014, No. 29(356), P. 33–48 (In Russ.).

11. Roberts B., Murray A. National and regional corporate spatial structure. The Annals of Regional Science. 2002, No. 36, P. 347–368.

12. Khasanov R. H. [To the question about the concept of "regional competitiveness"]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2014, No. 25(352), P. 19–25 48 (In Russ.).

13. Aslund A. How Russia became a market economy. Washington D. C. : The Brookings Institution; 1995.

14. Maltseva A. A., Dorofeev N. [With. The territory of innovative development: aspects of social and humanitarian design based on the functional approach]. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* 2014, No. 25(352), P. 33–39 (In Russ.).

15. Perez C. Finance and technical change: a long-term view. Cheltenham: Edward Elgar, 2004. 18 p.

© Белякова Г. Я., Аврамчикова Н. Т., Проскурнин С. Д., 2015

УДК 338 : 658

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1007–1013

ЛОГИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНА

Е. В. Белякова, Д. А. Прокопович, А. А. Рыжая, Н. Е. Гильц

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

Одним из основополагающих факторов роста национальной экономики является технологическое развитие предприятий промышленного комплекса регионов Российской Федерации. Выделены факторы, оказывающие влияние на развитие промышленности, предложено понятие технологического развития промышленного комплекса региона.

В Красноярском крае реализуется концепция перехода от экспортно-сырьевого к инновационному социально ориентированному типу развития. Основу промышленности края составляют цветная металлургия, лесная и деревообрабатывающая промышленность, машиностроение и предприятия космической и оборонной промышленности. Исследование инновационной деятельности предприятий и организаций показало, что среди регионов России Красноярский край имеет достаточно хорошие результаты, тем не менее, технологическая модернизация промышленного комплекса региона требует дальнейшего развития. Новые возможности для решения данной задачи открывает использование логистического подхода.

В 2014 г. одним из приоритетов государственной политики В. Путин обозначил Национальную технологическую инициативу, в рамках которой Агентством стратегических инициатив была разработана программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году.

Обеспечение конкурентоспособности регионов Сибири требует применения высоких технологий. Территория Красноярского края привлекательна для реализации ряда направлений Национальной технологической инициативы, прежде всего, развития системы беспилотного воздушного транспорта (AeroNet). Дана классификация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Определены проблемы развития беспилотной техники гражданского применения в РФ. Многоцелевой характер задач, решаемых системой AeroNet, открывает широкие возможности применения логистического подхода к её функционированию. В частности, ряд информационных задач может осуществляться на основе полета транспортного БПЛА. Предлагается простейшая модель, отражающая такой подход.

Ключевые слова: промышленный комплекс региона, логистический подход, Национальная технологическая инициатива, беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1007–1013

LOGISTIC APPROACH TO THE TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF REGIONAL INDUSTRIAL COMPLEX

E. V. Belyakova, D. A. Prokopovich, A. A. Ryzhaya, N. E. Gilts

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

The technological development enterprises of regional industrial complex are one of the fundamental factors of growth of the economy of the Russian Federation. The article highlighted the factors which influence industry development; proposed the definition of technological development of regional industrial complex.

Krasnoyarsk region has implemented the concept of transition from export-raw to innovative socially oriented type of development. Nonferrous metallurgy, forestry and woodworking industry, engineering and enterprise space are the basis of region industry. The innovation activities study of enterprises and organizations showed that Krasnoyarsk region has good results among other Russian regions; however, technological modernization of regional industrial complex is required further development. New solution for this problem is to use a logistic approach.

In 2014, one of the priorities of state policy of Vladimir Putin outlined the "National technology initiative", under which the Agency for strategic initiatives has developed a program of measures for the formation fundamentally new markets and create conditions for global technological leadership of Russia to 2035.

Siberian economy can become high-competitive only on a base of prospective technologies. Krasnoyarsk territory is attractive for implementation of a majority of National Technological Initiative directions. The most outstanding amidst is a network of pilot-free air transport (AeroNet). Multitasking of this system opens wide possibilities for logistical approach implementation. A set of tasks in collection, processing and delivery of information can be joined with transportational objectives. The paper reveals the simplest model to illustrate this cooperation

Keywords: regional industrial complex, logistic approach, national technology initiative, unmanned aerial vehicles.

Введение. В настоящее время на государственном уровне поставлена задача формирования индустриальной основы конкурентоспособной инновационной экономики. Однако переход на инновационную модель развития в России осуществляется крайне недостаточными темпами. На современном этапе инновационно-технологическое состояние регионов России имеет тенденции и закономерности, которые отражают их отставание как от ведущих стран мира, так и от стран Центрально-Восточной Европы по показателям инновационной активности предприятий, технологическому уровню производства, технологической восприимчивости и др. Одной из причин сложившейся ситуации является невысокая готовность бизнеса, институциональной и социокультурной среды поддержать модернизационные преобразования, предлагаемые государством. Кроме того, при проведении модернизации проблемы возникают в связи с региональной спецификой. Так, у регионов Сибири, в том числе и Красноярского края, имеющих сырьевую направленность, возникают проблемы при формировании инновационной экономики вследствие объективной необходимости сохранения добывающих отраслей, отраслей по первичной переработке ресурсов, традиционно не являющихся лидерами инновационного развития, в связи с особенностями расположения и сложившейся в советские времена структурой промышленного сектора, утратившей свою эффективность в условиях рынка начала XXI века.

Поэтому актуальной является задача поиска новых возможностей для повышения эффективности перевода промышленных комплексов регионов РФ с учетом выявленных особенностей и проблем на инновационную модель развития. С этой целью Агентством стратегических инициатив была разработана программа мер по формированию в России принципиально новых рынков и созданию условий для реализации стратегии достижения глобального лидерства. Территория Красноярского края привлекательна для реализации ряда направлений Национальной технологической инициативы, прежде всего, развития системы беспилотного воздушного транспорта (AeroNet).

Технологическое развития промышленного комплекса Красноярского края. В Красноярском крае доля промышленности составляет 80 %, а доходы крупнейших промышленных предприятий в 2013 г. достигли 1,045 трлн руб. [1].

Основу промышленности края составляют цветная металлургия, лесная и деревообрабатывающая промышленность, машиностроение и металлообработка, горнодобывающая и химическая промышленность, при этом удельный вес добывающей и обрабатывающей промышленности достигает 30,4 %.

Анализ научной литературы [2–5] позволил выделить ряд факторов, оказывающих влияние на развитие промышленности:

– научно-технический прогресс;
– экономическая политика государства;
– обеспеченность ресурсами;
– традиционно сложившаяся специализация;
– отраслевая структура капитальных вложений, финансируемых из различных источников.

Повышение эффективности и конкурентоспособности российской промышленности невозможно без технологических, организационных и управленческих изменений, обеспечивающих развитие и конкурентное преимущество перспективных отраслей промышленного комплекса.

Под технологическим развитием промышленного комплекса региона можно понимать процесс перевода совокупности предприятий промышленности, расположенных на одной территории, в их тесной технологической взаимосвязи и взаимодействии, на высокотехнологичный уровень с целью достижения наибольшего технологического соответствия различных производственных звеньев максимально высокому уровню [6].

Концепцией социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года ставилась задача перехода российской экономики от экспортно-сырьевого к инновационному социально ориентированному типу развития [7]. В Красноярском крае осуществляется последовательная реализация данного положения: утверждена стратегия инновационного развития Красноярского края на период до 2020 года «Инновационный край – 2020», был принят закон Красноярского края «О научной, научно-технической и инновационной деятельности в Красноярском крае», долгосрочная целевая программа «Развитие инновационной деятельности на территории Красноярского края» на 2012–2014 годы.

Результирующим показателем эффективности инновационной деятельности является показатель объема инновационных товаров, работ и услуг. Наибольший удельный вес в объеме инновационных товаров, работ, услуг в СФО занимает Красноярский край – 23,5 %, следом – Кемеровская область с 19,1 % и Иркутская область – 17,0 % [8].

В целом среди регионов России в Красноярском крае достаточно хорошие результаты инновационной деятельности, несмотря на это, технологическая модернизация промышленного комплекса региона

требует дальнейшего развития. Новые возможности для решения данной задачи открывает использование логистического подхода.

Логистический подход – это комплексное представление потоковых процессов в экономической деятельности региона на основе построения логистических систем и цепей с целью ее совершенствования. Мировой опыт показывает, что применение логистического подхода позволяет снизить издержки при перевозках, погрузочно-разгрузочных работах, хранении материальных ресурсов и готовой продукции и др. за счет совместимости оборудования, применения информационных технологий. Красноярский край остается регионом, недостаточно затронутым логистической активностью.

Программа "Национальная технологическая инициатива" как основа обеспечения глобального технологического лидерства в России. 4 декабря 2014 г. президент России В. Путин в послании к Федеральному Собранию обозначил один из приоритетов государственной политики: «На основе долгосрочного прогнозирования необходимо понять, с какими задачами Россия столкнется через 10–15 лет, какие передовые решения потребуются для того, чтобы обеспечить национальную безопасность, качество жизни людей, развитие отраслей нового технологического уклада» [9].

Агентством стратегических инициатив была запущена программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году, получившая название «Национальная технологическая инициатива» [10]. В рамках данной программы разрабатываются дорожные карты по развитию семи перспективных рынков и трех инфраструктурно-технологических направлений, призванных в первую очередь обеспечить рынки специалистами новых профессий [11].

Особый интерес для экономического комплекса Красноярского края представляют следующие группы рынков:

– AeroNet – распределенные системы беспилотных летательных аппаратов;

– MariNet – распределенные системы морского транспорта без экипажа;

– AutoNet – распределенная сеть автотранспорта без водителя;

– HealthNet – рынок систем, базирующихся на достижениях в науках о жизни и обеспечивающих рост продолжительности жизни, а также получение новых эффективных средств лечения тяжелых заболеваний;

– NeuroNet – рынок средств человеко-машинных коммуникаций, основанных на передовых разработках в нейротехнологиях и повышающих продуктивность человеко-машинных систем, производительность психических и мыслительных процессов;

– EnergyNet – рынок энергии, основанный на технологических решениях, обеспечивающих интеллектуализацию и распределенный характер энергетических сетей (smart grid);

– FoodNet – рынок продовольствия, обеспеченный интеллектуализацией, автоматизацией и роботизацией технологических процессов на всем протяжении жизненного цикла продуктов от производства до потребления, а также развитием биотехнологий.

Ставка на данные направления позволит обратить географическую удалённость территории, её сложный рельеф и суровые климатические условия в конкурентные преимущества как на российском уровне, так и в общемировом масштабе.

В рамках данной статьи остановимся на рассмотрении вопросов развития рынка беспилотных летательных аппаратов, реализации логистических возможностей их эксплуатации в регионе.

Реализация логистических возможностей эксплуатации БПЛА в регионе. Разработка и производство беспилотных авиационных систем в настоящее время являются наиболее прогрессирующим сегментом мировой авиационной отрасли. Расходы на создание новых и модернизацию существующих беспилотных авиационных систем непрерывно растут даже в периоды общего снижения деловой и промышленной активности в авиастроении. По данным маркетинговых исследований ведущих иностранных компаний, объем рынка в 2014 году составил 6,76 млрд долл. США. Из них приблизительно 66 % рынка относится к сегменту военного применения, 20 % – к сегменту обеспечения безопасности и только 14 % – к сегменту гражданского и коммерческого применения беспилотных авиационных систем [12].

В ходе форсайтной работы в рамках Национальной технологической инициативы, исходя из оценки существующих потребностей, научно-технического потенциала и компетенций отечественных компаний, социальной значимости специалистами были выделены следующие приоритетные направления развития отрасли в Российской Федерации:

1) дистанционное зондирование Земли и мониторинг;
2) применение в сельском хозяйстве;
3) перевозки;
4) поиск и спасание.

Как отмечается в дорожной карте по развитию рынка «АэроНэт», сегмент перевозки позволяет реализовать ключевое технологическое преимущество беспилотных авиационных систем – возможность быстрой адресной индивидуальной доставки товаров и грузов непосредственно потребителю без использования традиционной транспортной инфраструктуры (дорожной сети, складских терминалов, локальных дистрибьюторских пунктов, курьеров), что отражает сущность логистического подхода. Решая проблему «последней мили», беспилотные летательные аппараты осуществляют доставку потребителю в течение минут, тогда как традиционная курьерская доставка осуществляется в течение дня. Помимо традиционной экспресс-доставки одним из сегментов рынка может стать доставка медикаментов и биоматериалов.

Таким образом, на современном этапе развития беспилотной техники рынок коммерческих применений беспилотных авиационных систем находится в стадии формирования. Несмотря на то, что абсолютные показатели объема выполняемых работ пока невысоки, число участников рынка непрерывно растет, география расширяется, количество применений по отраслям увеличивается.

Важное место в беспилотных авиационных системах занимают беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Анализ научной литературы позволил провести классификацию БПЛА по сфере использования (рис. 1) [13–15].

В настоящее время специалисты выделяют ряд проблем развития беспилотной техники гражданского применения в РФ.

Техническая проблема состоит в том, что потенциальных заказчиков интересуют не БПЛА, пусть и с уникальными характеристиками, а полноценные системы, которые выполняют определенную функцию и не требуют квалифицированного обслуживания. Вторая проблема связана с первой и носит структурный характер. Большинство коммерческих заказчиков хотело бы покупать не беспилотные системы, а услуги (например, летные часы) у специализированных компаний. Данные проблемы могут быть решены по мере того, как гражданскими беспилотными авиационными системами начинают заниматься крупные промышленные компании, имеющие соответствующие ресурс и опыт. Наиболее значимой проблемой является необходимость создания нормативно-правовой базы для сертификации БПЛА и их интеграции в существующую систему управления воздушным движением. Комплексно эта проблема не решена нигде в мире, несмотря на значительные усилия.

В соответствии с прогнозами развития рынка «АэроНэт», над территорией Российской Федерации к 2035 году постоянно (в режиме 24/7/365) могут находиться в воздухе не менее 100 000 БПЛА, объединенных в единую систему предоставления работ и услуг для удовлетворения различных, постоянно возрастающих потребностей экономики [12].

Перспектива лавинообразного роста числа беспилотных летательных аппаратов в ближайшем будущем ставит проблему рационализации воздушного движения, избегания транспортных затруднений. Одним из средств её решения видится объединение в одном полёте задач транспортировки и задач присутствия. Действительно, основными целями эксплуатации БПЛА в мирных целях являются доставка грузов и пребывание аппарата в воздухе в определённом районе *C* для съёмки и иного получения информации, ретрансляции сигналов и других действий, не связанных с перемещением чего-либо материального.

Летательный аппарат помимо основной полезной нагрузки может брать на борт оборудование, необходимое для съёмки территории в том или ином диапазоне, раздачи мобильной связи и решения других аналогичных задач во время полёта по планируемому маршруту. Таким образом, определённая часть территории с той или иной периодичностью оказывается в зоне покрытия летательных аппаратов. В этом случае отсутствует необходимость запускать специальный БПЛА, что потенциально экономит средства. Каждый участок территории предъявляет свою потребность в соответствующем обслуживании, что выражается максимально допустимым временным интервалом между актами присутствия над ней воздушного судна. Например, участок газопровода должен инспектироваться, скажем, каждые шесть часов. При этом часть инспекций может быть проведена транспортными беспилотниками, следующими близким курсом, а для другой части наблюдений необходимо запускать собственные аппараты. Некоторое отклонение от прямого курса ради присутствия в находящихся недалеко и давно не навещавшихся точках оправдывается вознаграждением, получаемым оператором рейса от оператора информационной задачи.

Рис. 1. Классификация БПЛА по назначению

Представленные соображения обусловливают определение в качестве целевого критерия модели минимум совокупных затрат информационного оператора на «покупку» пролётов транспортных БПЛА, несущих необходимое оборудование, над подконтрольной территорией и на осуществление своих «патрульных» рейсов. Управляемыми переменными модели будут размеры вознаграждений (оферты) за пролёт над конкретным местом. Их величины напрямую зависят от времени, прошедшего с предыдущей инспекции, и не могут превосходить собственных затрат на осуществление соответствующих полётов.

Маршрутная модель может быть построена как на координатной сетке, так и на графе. Логика организации воздушного движения БПЛА, линейная конфигурация многих подлежащих информационному обслуживанию наземных объектов, сравнительная простота моделирования отдают перевес подходу, основанному на графе. Простейшая модель в этом случае будет выглядеть следующим образом.

Имеется множество $P = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ точек, являющихся пунктами отправления и назначения БПЛА. Для любых двух различных его элементов определена интенсивность сообщения (среднее число вылетов в заданном направлении в течение часа, суток и т. д.). Последний показатель может принимать для некоторых пар и нулевые значения (отсутствие прямого сообщения). Множество $P' = \{p_{n+1}, p_{n+2}, \ldots, p_{n+m}\}$ представляет собой совокупность узловых точек системы навигации БПЛА. Эти точки являются своего рода перекрёстками воздушного сообщения.

Множество $L = \{l_1, l_2, \ldots, l_k\}$ образуемое некоторыми парами элементов множества $P \cup P'$, представляет собой совокупность элементарных сегментов, т. е. отрезков между точками, принадлежащими множествам P и P'. Основным атрибутом элемента множества L является его длина, которая при необходимости и с учётом различных значимых факторов может быть конвертирована в затратность прохождения данной дуги графа. Другой атрибут представляет максимально допустимое время между пролётами по этой дуге. Учёт этого фактора позволяет задать для элементов множества L платёжную функцию $u_i(l_i,\tau_i)$, где τ_i – время, прошедшее с момента предыдущего посещения ребра l_i.

Для каждого элемента декартова произведения множества P кроме главной диагонали соответствующей матрицы определено множество маршрутов $\Omega_{ij} = \{R_{ijs}\}$, где i – номер пункта отправления; j – номер пункта назначения; s – номер цепи, соединяющей соответствующие точки графа. Количество таких цепей является разным для разных вершин, однако для удобства моделирования целесообразно задать максимальное количество вариантов пути между двумя точками. При этом для некоторых i и j, начиная с некоторого s, меньшего этого максимума, будет справедливым тождество $R_{ijs} \equiv R_{ijs+1}$.

Таким образом, для любого маршрута в конкретный момент времени можно определить затраты на его прохождение и доход, получаемый оператором полёта в случае направления БПЛА по данной цепи. Маршрут, обеспечивающий максимальный чистый доход, и будет пройден.

Проиллюстрируем указанные соображения на примере простейшей модели (рис. 2).

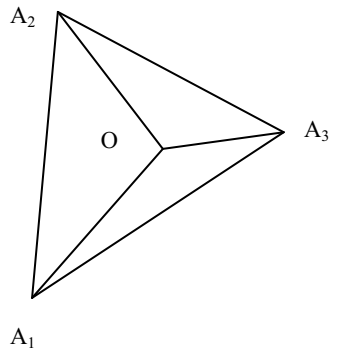


Рис. 2. Конфигурация простейшей транспортной сети

Между пунктами A_1, A_2 и A_3 организовано транспортное сообщение. Рейсы могут выполняться напрямую либо через точку О при наличии соответствующего интереса у перевозчика. Каждое из шести рёбер подлежит периодической инспекции. Задана длина каждого ребра (или затраты на его преодоление).

Квантификация модели по времени должна обеспечить ординарность потока рейсов, т. е. временной интервал следует брать таким, чтобы сделать пренебрежимо малой возможность одновременного выполнения двух или более рейсов при соответствующих интенсивностях полётов. При таком условии размер модельного интервала времени должен составлять сотые доли от интенсивностей. В отношении каждого из шести сегментов устанавливается счётчик периодов времени с момента предшествующего посещения. В зависимости от «давности» меняется цена, предлагаемая за пролёт над данным сегментом. В модели установлены три интервала, делящих максимально допустимое время между инспекциями на равные части. При этом в первую треть плата не предлагается вовсе в силу низкой актуальности очередного посещения сегмента, а в дальнейшем она растёт, приближаясь к стоимости самостоятельного инспекционного вылета. Последний обязательно осуществляется в случае, если в течение межинспекционного интервала так и не нашлось попутного рейса.

С помощью генератора случайных чисел в модели реализовано появление «предложений» на полёты между всеми тремя основными точками.

Для каждого маршрута сравниваются два варианта его прохождения – напрямик и через точку О, и делается выбор в пользу наиболее выгодного пути следования. Счётчик времени для только что навещённого сегмента обнуляется.

Модель подсчитывает общий размер платы за инспекцию сегментов сторонними БПЛА и величину затрат на организацию собственных рейсов. Манипулируя «тарифными планами», т. е. размерами вознаграждений аутсорсерам за выполнение информационной задачи над соответствующими сегментами в соответствующие временные интервалы, можно добиться минимизации совокупных затрат.

К очевидным направлениям развития модели следует отнести увеличение опорных точек и сегментов, варьирование интенсивностей полётов в зависимости от модельного времени, задание направлений полётов, дифференциацию летательных аппаратов по типу, массе и другим характеристикам.

Заключение. Широкая кооперация в использовании беспилотных летательных аппаратов, обеспечение многофункциональности их работы будут содействовать реализации национальной технологической стратегии в области AeroNet и обеспечит высокие темпы развития промышленного комплекса Красноярского края и других регионов Сибири.

Библиографические ссылки

1. Расстановка приоритетов / Аналитический центр «Эксперт – Сибирь» // Эксперт – Сибирь. 2015. № 24. С. 8–14.

2. Ермакова Ж. А. Технологическая модернизация промышленности России: стратегия и организационно-экономические факторы (региональный аспект) : монография. Екатеринбург : Ин-т экономики УрО РАН, 2007. 360 с.

3. Кочемаскин А. Н., Беляков Г. П. Понятие и экономическая сущность научно-технологического развития // Вопросы экономической теории. Макроэкономика. 2014. № 2. С. 38–41.

4. Владимирова О. Н. К вопросу о классификации факторов формирования инновационной восприимчивости региона // Корпоративные финансы. 2011. № 2 (18). С. 15–20.

5. Фоломьев А. Н. Научный и научно-технический потенциал: содержание и способы его измерения // Экономический потенциал России: его развитие и эффективное использование : сб. научн. ст. М. : Изд-во РАГС, 2009. С. 25.

6. Белякова Е. В., Беляков Р. А. Принципы формирования стратегии технологического развития промышленного комплекса региона // Вестник СибГАУ. 2014. № 5 (57). С. 216–220.

7. Концепция социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р. [Электронный ресурс]. URL: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/fcp/rasp_2008_n1662_red_08.08.2009. (дата обращения: 10.10.2015).

8. Регионы России. Социально-экономические показатели 2014 : стат. сб. / Росстат. М., 2014. 900 с.

9. Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 04.12.2014 [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_171774/ (дата обращения: 10.10.2015).

10. Официальный сайт Агентства стратегических инициатив Российской Федерации. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс]. URL: https://asi.ru/nti/ (дата обращения: 30.10.2015).

11. ПМЭФ-2015: Национальная технологическая инициатива – лидерство России на глобальных технологических рынках к 2035 году [Электронный ресурс]. URL: http://asi.ru/news/37181/ (дата обращения: 30.10.2015).

12. Аннотация к плану мероприятий («дорожной карте») по развитию рынка «АэроНэт» Национальной технологической инициативы [Электронный ресурс]. URL: https://asi.ru/nti/docs/AeroNet.pdf (дата обращения: 01.11.2015).

13. Зинченко О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс]. URL: http://www.racurs.ru/www_download/articles/UAV_1.pdf (дата обращения: 01.11.2015).

14. Беспилотные авиационные системы (БАС) – наиболее прогрессирующий сегмент мировой авиации. [Электронный ресурс]. URL: http://fea.ru/news/5599 (дата обращения: 01.11.2015).

15. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В. А. Фетисов [и др.] [Электронный ресурс]. Уфа : ФОТОН, 2014. 217 с. URL: http://coollib. com/b/322192/read (дата обращения: 01.11.2015).

References

1. [Prioritization]. *Analiticheskiy tsentr “Ekspert – Sibir’”. Ekspert – Sibir’*. 2015, No. 24, P. 8–14 (In Russ.).

2. Ermakova Zh. A. *Tekhnologicheskaya modernizatsiya promyshlennosti Rossii: strategiya i organizatsionno-ekonomicheskie faktory (regional’nyy aspect).* [Technological modernization of Russian industry: strategy and organizational economical factors (regional aspect)]. Ekaterinburg: Institute of Economics UB RAN Publ., 2007, 360 p.

3. Kochemaskin A. N., Belyakov G. P. [The concept and economic essence of the research and technological development]. *Voprosy ekonomicheskoy teorii. Makroekonomika*, 2014, No. 2, P. 38–41 (In Russ.).

4. Vladimirova O. N. [To the question on classification of factors of formation of innovative susceptibility of the region]. *Korporativnye finansy*. 2011, No. 2 (18), P. 15–20 (In Russ.).

5. Folom’ev A. N. [Scientific and scientific-technical potential: the Content and its measurement]. *Ekonomicheskiy potentsial Rossii: ego razvitie i effektivnoe ispol’zovanie: Sbornik nauchnykh statey.* Moscow, RAGS Publ., 2009, P. 25 (In Russ.).

6. Belyakova E. V., Belyakov R. A. [Principles of formation of strategy of technological development of the industrial complex of the region]. *Vestnik SibGAU*. 2014, No. 5 (57), P. 216–220 (In Russ.).

7. RF order “The concept of socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2020”. Approved by order of the Government of the Russian of November 17, 2008, № 1662-r. (In Russ.). Available at: http://economy.gov.ru/minec/activity/sections/fcp/rasp_2008_n1662_red_08.08.2009 (accessed 10.10.2015).

8. *Regiony Rossii. Sotsial’no-ekonomicheskie pokazateli 2014.* [The Regions of Russia. Socio-economic indicators of 2014]. Moscow, Rosstat Publ., 2014, 900 p.

9. *Poslanie Prezidenta RF Federal’nomu Sobraniyu*. [Message from the President of the Russian Federation to

the Federal Assembly] (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_171774/ (accessed 10.10.2015).

10. *Ofitsial'nyy sayt Agentstva strategicheskikh initsiativ Rossiyskoy Federatsii. Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa.* [Official site of the Agency for strategic initiatives Russian Federation. National technology initiative] (In Russ.). Available at: https://asi.ru/nti/ (accessed 30.10.2015).

11. *PMEF-2015: Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa – liderstvo Rossii na global'nykh tekhnologicheskikh rynkakh k 2035 godu.* [SPIEF 2015: the national technology initiative – Russia's leadership in the global technology markets to 2035] (In Russ.). Available at: http://asi.ru/news/37181/ (accessed 30.10.2015).

12. *Annotatsiya k planu meropriyatiy ("dorozhnoy karte") po razvitiyu rynka AeroNet Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy*. [Abstract to the plan of measures (road map) for development of the market AERONET National technology initiative]. (In Russ.). Available at: https://asi.ru/nti/docs/AeroNet.pdf (accessed 01.11.2015).

13. Zinchenko O. N. *Bespilotnye letatel'nye apparaty: primenenie v tselyakh aerofotos"emki dlya kartografirovaniya* [Unmanned aerial vehicles: application to aerial photography for mapping] (In Russ.). Available at: http://www.racurs.ru/www_download/articles/UAV_1.pdf (accessed 01.11.2015).

14. *Bespilotnye aviatsionnye sistemy (BAS) – naibolee progressiruyushchiy segment mirovoy aviatsii.* [Unmanned aircraft systems (UAS) are the most progressive segment of world aviation] (In Russ.). Available at: http://fea.ru/news/5599 (accessed 01.11.2015).

15. Fetisov V. A., Neugodnikova L. M., Adamovskiy V. V., Krasnoperov R. A. *Bespilotnaya aviatsiya: terminologiya, klassifikatsiya, sovremennoe sostoyanie* [Unmanned aviation: terminology, classification, current status]. Ufa, FOTON Publ., 2014, P. 217 (In Russ.). Available at: http://coollib.com/b/322192/read (accessed 01.11.2015).

© Белякова Е. В., Прокопович Д. А., Рыжая А. А., Гильц Н. Е., 2015

УДК 338.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1014–1021

КАТЕГОРИАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

О. Б. Воейкова*, В. И. Лячин

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

Формирование инновационной экономики в России требует теоретического осмысления малоизученной экономистами категории инновационного пространства, что является особенно важным в условиях становления постиндустриальной общественно-экономической формации, которая всецело зависит от увеличения масштабов инновационной деятельности, роста численности инновационно ориентированных объектов, их пространственного расширения на основе горизонтальных и вертикальных пространственных связей.

Цель данной статьи заключается, прежде всего, в поиске возможных методологических подходов к категориальному определению инновационного пространства как особой экономической категории. В этой связи были предложены три возможных приема к исследованию инновационного пространства, в соответствии с которыми и сделана обобщающая дефиниция данной экономической категории.

В качестве первого методологического приема используется систематизированная совокупность пространственных принципов, позволяющих охарактеризовать основные свойства инновационного пространства с точки зрения естественно-научных представлений о пространстве. Второй предлагаемый методологический прием основан на использовании представлений о свойствах инновационной среды, которые во многом определяют свойства инновационного пространства.

Для исследования структурного состава и пространственной координации объектов инновационного пространства предлагается использовать еще один методологический прием, основанный на применении системных принципов. Делается акцент на том, что инновационное пространство представляет собой открытую самоорганизующуюся систему, а потому является объектом для исследования на основе системного подхода. В результате были обоснованы системообразующий элемент и системообразующая функция инновационного пространства, задающие его единое функциональное назначение.

Главным выводом проделанной работы является развернутая дефиниция рассматриваемой экономической категории, согласно которой инновационное пространство определяется как системная форма организации объектов инновационной деятельности, основанная на социально-экономических отношениях и направленная на инновационное преобразование действительности, характеризующаяся соответствующей структурой, конфигурацией и территориальной протяженностью.

Проблема исследования инновационного пространства и способов его организации имеет значимость для любой из отраслей народного хозяйства, в том числе и для ракетно-космической отрасли (РКО). Это обусловлено необходимостью пространственной организации инновационной сферы РКО, что предполагает поиск решений по координации объектов инновационной инфраструктуры с разной степенью удаленности друг от друга, а также с нарушенными либо с несформированными разнопорядковыми интеграционными связями.

Ключевые слова: инновационное пространство, пространственные принципы как метод исследования, пространственная организация объектов инновационной деятельности.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1014–1021

CATEGORICAL DEFINITION OF INNOVATIVE SPACE

O. B. Voeykova*, V. I. Lyachin

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

Formation of innovative economy in Russia requires a theoretical understanding of the innovative space category which is poorly understood by economists. This is especially important in the formation of post-industrial socio-economic structure, which entirely depends on the scale of innovative activity, growth in the number of innovation-oriented objects, their spatial extension based on the horizontal and vertical spatial relations.

The purpose of this article is to look for possible methodological approaches to categorical definition of innovative space as a special economic category. In this regard, three possible admissions to the study of innovative space were proposed, in accordance with which a generalizing definition of this economic category was made.

As a first methodological technique a systematic set of spatial principles, in order to characterize the basic properties of innovative space from the point of view of natural science concepts of space is used. The second methodological technique, proposed in the article, is based on the use of ideas about the properties of the innovative environment, which largely determine the properties of the innovation space.

To study the structural composition and spatial coordination of innovative space objects it is proposed to use another methodological technique based on the application of systemic principles. The article focuses on the fact that innovation space is an open self-organizing system, and therefore this is the object of study on the basis of system approach. The result has been substantiated backbone element and innovative system-function space, defining its single functional purpose.

The main conclusion of this work is expanded definition of considered economic categories, according to which innovation space is defined as a system's form of organization of innovation activity objects based on socio-economic relations that are innovative and aimed at the transformation of reality, characterized by an appropriate structure, configuration and territorial extent.

The problem of innovative space research and the ways of its organization have significance for any of the sectors of the economy, including for the space industry (RCO). This is so that the spatial organization of innovation sphere of RCO, which involves finding solutions for the coordination of innovative infrastructure objects with varying degrees of remoteness from each other, as well as broken or not formed over different integration links.

Keywords: innovation space, spatial principles as a method to study spatial organization of objects of innovation activity.

Введение. Идея инновационного пространства является фундаментальной как для экономической теории, так и для миропонимания в целом, поскольку она отражает сущность глубинных изменений, происходящих в экономическом и в общественном развитии человечества. Изменений, вызванных переходом от индустриальной цивилизации с преобладающим использованием невозобновляемых природных ресурсов к постиндустриальному развитию, основанному на инновационном обновлении общества и всех его систем, а также на развертывании в пространстве и времени мирового инновационного процесса. Однако в настоящее время, несмотря на интенсивное развитие инноватики как самостоятельной отрасли научного знания, изучающей закономерности инновационных изменений в макро- и микроэкономических системах, пока еще не сформировалось представление о сущности данной фундаментальной категории, и нет целостной концепции организации инновационного пространства.

Понятие «инновационное пространство», несмотря на его широкое использование в экономической литературе, употребляется большинством исследователей главным образом в контекстном плане, без соответствующего теоретического обоснования, что фактически не позволяет установить качественную определенность данной экономической категории, представить ее сущностное содержание. При этом понимание устройства инновационного пространства, его основных свойств и законов позволило бы обеспечить решение актуальных проблем его организации, а многие понятия инноватики могли бы раскрыться совершенно с иной стороны с учетом использования более глубокого содержания этой категории.

Категория пространства в общенаучном представлении. Для того чтобы категориально определить инновационное пространство, воспользуемся, в первую очередь, достаточно хорошо изученными естественно-научным и философским представлениями о пространстве. Так, с философской точки зрения пространство есть объективная всеобщая форма бытия материального мира, характеризующая его протяженность, структурность, сосуществование и взаимодействие его внутренних элементов [1].

Помимо этого, естественная наука, уделявшая достаточно пристальное внимание категории пространства–времени, накопила ряд положений, которые могут быть представлены определенной совокупностью пространственных принципов и использованы для исследования основных свойств инновационного пространства.

Можно выделить десять основных пространственных принципов, отражающих характерные свойства пространства как научной категории.

1. Объективность, т. е. существование пространства независимо от восприятия субъекта.
2. Всеобщность, т. е. его абсолютность и целостность.
3. Неразрывность с материей, т. е. невозможность его существования вне материи и движения.
4. Неотделимость от времени.
5. Бесконечность или неограниченность пространства, проистекающая из бесконечности материального мира.
6. Протяженность, отражающая размеры пространства.
7. Непрерывность, характеризующаяся отсутствием в пространстве разрывов и пустот и образующая диалектическое единство с дискретностью (прерывностью), представленной разнообразием и неповторимостью структурных компонентов материи, формирующих пространство, тесная взаимосвязь которых, единство и целостность обусловливают существование непрерывности.
8. Относительность, т. е. существование пространства в конкретных формах соответственно формам

движущейся материи. Пространство, являясь формой связи объектов материального мира, принимает конфигурацию этой материи. Данное обстоятельство отмечено релятивистской концепцией пространства, основанной на теории относительности А. Эйнштейна, согласно которой пространство и время существуют постольку, поскольку существует материя, в связи с чем пространство есть отношение или система отношений между физическими объектами материального мира.

9. Размерность (многомерность) – это одно из фундаментальных свойств пространства, исходя из которого в процессе развития материи происходит качественное усложнение внутреннего состава материальных объектов, включенных в пространство. Общая теория относительности А. Эйнштейна, отмечая, что пространство не существует отдельно как нечто противоположное «тому, что заполняет пространство и что зависит от координат» [2], тем самым показывает зависимость самого пространства от системы координат. То есть пространство характеризуется определенной размерностью и даже многомерностью, внутренней скоорденированностью составляющих его объектов.

10. Обратимость – еще одно, не менее важное свойство пространства, согласно которому в каждую точку пространства можно возвращаться снова и снова, т. е. пространство является обратимым, в отличие от неразрывно связанного с ним необратимого времени, поскольку нельзя возвратиться назад в какую-либо точку времени и нельзя перескочить через какой-либо временной промежуток в будущее.

Применение данных пространственных принципов к определению характерных свойств инновационного пространства представлено в таблице.

Инновационное пространство как специфическая экономическая категория. Для того чтобы дать развернутое определение искомому понятию, необходимо уточнить, что инновационное пространство является специфической экономической категорией, которая не может быть описана только путем естественно-научных представлений, математических или физических формул либо с чисто географических позиций в территориальном контексте. Это связано с тем, что отношения между объектами, формирующими инновационное пространство, обладают вполне определенными свойствами и объединяют в единое целое науку, производство и конечное потребление – вещи, казалось бы, несовместные в одной смысловой категории.

Инновационная деятельность базируется, прежде всего, на научных исследованиях и разработках, т. е. без генерации, реализации и распространения новых идей инновационное пространство не может быть организовано. В этом, с одной стороны, и заключается специфика данной категории, поскольку идеи, мысли, знания, информация как основополагающие элементы инновации не имеют материально-вещественного содержания, т. е. являются абстрактными, а следовательно, не могут быть описаны пространственными характеристиками, поскольку пространство – это атрибут материи, как было указано выше, в естественно-научном представлении о пространстве.

Определение свойств инновационного пространства в соответствии с пространственными принципами

Свойство пространства	Свойство инновационного пространства
Объективность	Существует независимо от субъективного восприятия, что проявлено в объективной доступности инноваций
Всеобщность	Охватывает все человечество в силу востребованности инноваций в обществе
Неразрывность с материей	Привязанность к объектам инновационной инфраструктуры, направленной на создание, внедрение и распространение инноваций
Неотделимость от времени	Зависимость инновационного пространства от временнóго фактора, ограниченность инноваций во времени, их быстрое моральное устаревание. Динамичность, нелинейность инновационного пространства, потребность в изменениях
Бесконечность	Бесконечное расширение инновационного пространства, ограниченность которого связана только с техническими возможностями инновационной инфраструктуры
Протяженность	Глобальные масштабы инновационного пространства, происходящие из глобального характера инновационного способа производства. Открытые инновации, охватывающие все страны
Непрерывность / дискретность (прерывность)	Целостность и связность инновационного пространства. Невозможность существования в условиях разрывов и пустот. Неоднородность инновационного пространства, проявляющаяся в сгущениях и разряжениях, а также в наличии ядра инновационной активности
Относительность	Современные формы существования инновационного пространства соответствуют общим тенденциям и закономерностям развития мирового инновационного процесса
Размерность (многомерность)	Структура инновационного пространства базируется на каркасе, включающем в себя 4 измерения: генерация знаний – производство инноваций – инвестиционный сектор – государственное регулирование [3]
Обратимость	Спиралевидное, циклическое развитие со способностью после определённого цикла возвращаться на более высокую стадию

С другой стороны, сущность инновации состоит в том, что она является не просто отвлеченной идеей, но идеей, воплощенной в конкретном объекте, внедренном в производство. Без научной, рационализаторской, новаторской идеи не может быть инновации, но и сама по себе любая научная идея еще не является инновацией до процесса ее объективации и последующего внедрения. Генерация знаний со стороны научной отрасли не означает автоматической организации инновационного пространства. И здесь уместно обратиться к отечественному опыту, когда наличие значительных научных результатов в стране, копившихся долгие годы еще со времен советского прошлого, не стало залогом быстрого формирования и развития инновационной экономики в новой России. Большой научный задел не позволил нам в кратчайшие сроки сформировать инновационное пространство в стране.

В инновации изначально абстрактная идея обретает вполне определенную материально-вещественную оболочку, а затем принимает соответствующую экономическую форму товара с конкретными потребительскими качествами (рис. 1).

Это происходит благодаря соприкосновению идеи с целым рядом объектов, находящихся в определенных отношениях и связях между собой, задействованных в процессе своеобразного инновационного формообразования, обеспечивающих доведение абстрактной идеи до ее материального воплощения в форме новшества, а после его внедрения – в форме инновации, востребованной со стороны общества и экономики.

Таким образом, идея становится инновацией в условиях *некой среды* обитания, обладающей соответствующими свойствами, которая заполняет инновационное пространство и представляет собой *определенное множество взаимодействующих между собой инновационно ориентированных объектов, а также сопутствующих им процессов и явлений*. К элементам инновационной среды, согласно исследованиям А. С. Бендь, относятся создатели новшеств – инноваторы, субъекты нововведений (заказчики); предприятия – изготовители новой техники, инновационные посредники, инвесторы, государство и потребители новшеств, а также совокупность законодательных норм, формальных и неформальных правил, влияющих на взаимодействие между ними [4]. В. С. Гойло, описывая процесс выработки новых идей, указывал помимо прочего на необходимость обеспечения «невещных условий умственного труда» [5], своеобразной «ноосферы» на рабочем месте исследователя, что также можно отнести к необходимым элементам инновационной среды или к явлениям, сопутствующим объектам инновационного пространства.

Инновационное пространство как система: структурный состав и основные свойства. Представление об инновационном пространстве как о форме связи объектов материального мира, включенных в его структуру, позволяет определить данную экономическую категорию через систему отношений и связей в социально-экономической сфере между определенным множеством объектов, явлений, процессов, вовлеченных в инновационную деятельность, т. е. ориентированных на инновации. А принцип неразрывности пространства и времени позволяет охарактеризовать инновационное пространство как сложную социально-экономическую систему, состоящую из определенного множества взаимосвязанных объектов и пребывающую в постоянном движении во времени, периодически меняющую свою «природу» в соответствии с изменениями, происходящими на уровне включенных в нее объектов.

Как было отмечено выше, множество взаимодействующих между собой инновационно ориентированных объектов, а также сопутствующих им процессов и явлений – суть инновационная среда, формирующая инновационное пространство. Инновационное пространство находится в отношении взаимовлияния со средой, его наполняющей, т. е. со всем тем, что организует это пространство. Поэтому свойства среды определяют свойства пространства, ею образованного, благодаря чему описание основных свойств инновационной среды делает возможным установление характера инновационного пространства. К таким свойствам можно было бы отнести следующие [6]:

1) открытость;
2) аутопойезис (самосозидание, самодостраивание, самоорганизация);
3) синергизм;
4) восприимчивость к инновациям.

В соответствии с этим инновационное пространство может быть представлено как открытая, самоорганизующаяся, со способностью к синергии и восприимчивая к инновациям система.

Открытость инновационного пространства выражается во взаимодействии составляющих его объектов с внешним миром, что позволяет ему обмениваться энергией, веществом и информацией со своим окружением. Исходя из этого свойства, инновационное пространство *делится на внутреннее и внешнее* путем определенного разграничения, что подчеркивает важность установления пространственных границ, являющихся существенной характеристикой данной категории.

Рис. 1. Процесс формообразования инновации

Выявление границ инновационного пространства, а следовательно, его конфигурации или внешнего очертания, происходящего из взаимного расположения объектов, охваченных инновационными отношениями, позволяет определить особенности структурного построения инновационного пространства. Структурность как было подчеркнуто выше, является одним из важнейших атрибутов материи и выражает упорядоченность ее существования, а также конкретные формы пространства, в которых она проявляется. Именно благодаря структуре объекты, включенные в инновационное пространство, образуют определенную целостность, при которой каждый объект, участвующий в инновационных преобразованиях, в итоге оказывается связанным с остальными, а его свойства не могут быть раскрыты без учета возникших связей. Эти связи, являющиеся наиболее устойчивыми, направленные на получение и распространение инноваций, организуют структуру инновационного пространства и обеспечивают упорядоченность всех наполняющих его объектов.

Структура инновационного пространства может находиться в процессе перманентного изменения, являясь подверженной влиянию внешних сил, что приводит к периодическому изменению и модификации внутренней сущности, природы инновационного пространства. Данное обстоятельство отражено следующим свойством – аутопойезисом, благодаря которому инновационное пространство не только движется к построению себя, собственной самоорганизации, но и к перестройке либо к изменению своей структуры, усложнению и достраиванию ее под внешним воздействием. На практике это может быть представлено через изменение границ и конфигурации инновационного пространства при дополнении или сокращении параметров инновационной деятельности в зависимости от спроса на инновации и пр.

В связи с этим организация инновационного пространства есть саморазвивающийся, самовоспроизводящийся во времени процесс, приводящий к эволюционированию составляющих его объектов и связей между ними, переходу пространства как определенной целостности к новому субстанциональному качеству. Аутопойезис, или самоорганизация инновационного пространства, согласуется с рассмотренной выше естественно-научной точкой зрения, представленной принципом пространственной многомерности, отражающей качественное усложнение внутренней структуры пространства в процессе его развития, появление его сущностного разнообразия. При самоорганизации изменения в структурном составе инновационного пространства происходят как по вертикали, так и по горизонтали упорядоченных объектов в соответствии с принципами субординации и координации, затрагивая каждый из уровней, занимающих соответствующее место в пространственной системе координат.

Развитие инновационного пространства через модификацию его внутренних связей и изменение внутреннего состава, приводящее к появлению новых форм пространственной организации, множества пространственных измерений, не означает разрушения целостности. Измерения, согласно исследованиям В. Л. Алтухова, представляют собой «срез» целого по определенному основанию и являются «неслившейся природой целого» [7]. Причем неразрывная связь разнообразных форм, возникающих и развивающихся в рамках этого целого, поддерживается за счет интегративного качества как естественного проявления целостности. Благодаря интеграции многомерные формы в рамках единого целостного пространства связаны между собой таким образом, что суммирующий эффект от их взаимодействия существенно превосходит эффект, получаемый от каждой в отдельности. Именно это определяет способность инновационного пространства генерировать синергию, что обозначено выше как третья пространственная характеристика, проистекающая из свойств инновационной среды.

Синергетический эффект возникает путем интеграции по определенному признаку обособленных, уникальных по своей природе объектов, через выделение некоего центра, параметра упорядоченности, вокруг которого и начинает разворачиваться вовне сложная система, вырастая из внешнего хаоса. По образному выражению С. П. Капицы, такой организующий центр, влияющий на поведение столь разных по своему характеру и функциям объектов в рамках некой целостности, похож на дирижера, управляющего оркестром, в котором «каждый участник мог бы вести свою партию, считая себя солистом, или доказывать свой суверенитет коллегам». Несмотря на ограничения, накладываемые со стороны дирижера на возможности каждого из оркестрантов, в организованной целостности, представленной оркестром, «появляется совершенно новое качество – способность вести себя согласованно, просто, гармонично». При этом ученый подчеркивает, что «дирижер» никем не назначается, «он возникает в ходе самоорганизации, отбирающей из океана возможностей ничтожную толику и упорядочивающей поведение системы» [8].

Важность выделения центра организации пространства отмечали не только представители точных наук, но и гуманитарии. Задолго до С. Капицы русский философ XIX века П. А. Флоренский при исследовании понятия художественного пространства, и в частности, пространства мысли, характеризовал его не только как «внеположность, т. е. нахождение тех или других отдельностей вне друг друга», но и как универсальный *моделирующий континуум*, «множество непрерывно примыкающих друг к другу элементов» по определенному, фиксированному признаку [9].

В теории систем роль центра, приводящего разрозненные элементы к организации в систему, играет системообразующий элемент, выявление которого является одним из основных этапов системного моделирования. Также и в синергетическом понимании целостность может быть конституирована по заданному признаку или свойству, выполняющему функцию единой меры, которая делает соотносящиеся между собой части и целое соизмеримыми.

При определении или организации инновационного пространства таким центром может стать какое-либо новшество, вокруг которого начнет разворачиваться

система элементов, связанных триединой задачей по созданию, производству и реализации этого новшества. Либо это может быть уже существующая инновационная система, которая будет достраиваться путем включения в нее новых объектов, расположенных в разной степени удаленности от нее, увеличивающих ее потенциал в целом, а также расширяющих возможности действующих и вновь вошедших в нее компонентов. И здесь закономерен вопрос о протяженности инновационного пространства.

Протяженность инновационного пространства. Для разрешения вопроса о размерах или протяженности инновационного пространства необходимо исходить из представления об организованной целостности пространства, при которой объекты, входящие в состав пространственной организации, согласованно сосуществуют друг с другом благодаря объединяющим их отношениям и связям. При этом из всей совокупности связей или, иными словами, функций объектов, структурирующих конфигурацию пространства, необходимо выделить те, которые отражают определенную общность этих объектов и, в конечном итоге, приводят к формированию заданной целостности. Это говорит о необходимости поиска функции, которая являлась бы общей для всех объектов инновационного пространства и опосредовала причинно-следственные связи его существования, задавая тем самым его функциональную целостность. Выявление такой исходной функции, связывающей все компоненты инновационного пространства в единое целое, является следующим этапом после поиска организующего центра (системообразующего элемента) при изучении или организации (моделировании) инновационного пространства.

Функция, являясь существенной характеристикой различных объектов, может быть исследована с помощью функционального подхода как одного из основных типов научного познания. Поскольку инновационное пространство представляет собой сложную целенаправленно организованную систему, то оно находится в поле функционального исследования, так как функциональный подход (в отличие от структурного, казуального и др.) применим в основном к направленно организованным системам [10]. Одним из методов функционального исследования является метод «черного ящика», при котором осуществляется тестирование функционального поведения объекта с точки зрения внешнего мира, при котором не используется знание о внутреннем устройстве тестируемого объекта. Метод позволяет изучать поведение объектов, систем, т. е. их реакций на разнообразные внешние воздействия, и в то же время абстрагироваться от их внутреннего устройства.

Функция задается объекту извне и отражает роль, выполняемую им по отношению к системе более высокого порядка, в которую он включен составной частью наряду с другими объектами, выступающими для него внешней средой. Предположим, что для инновационного пространства такими внешними объектами-системами являются другие пространства, выполняющие иные функциональные назначения, с которыми оно пресекается и которые в совокупности составляют для него систему более высокого порядка (рис. 2). Допустим также, что более широкой системой по отношению к инновационному пространству является макросистема, представленная новой общественно-экономической формацией (по терминологии К. Маркса) постиндустриального типа, основанная на созидательных, творческих способностях человека; информации как стратегическом ресурсе социально-экономического развития; инновационном способе производства; новых отношениях собственности [11; 12].

В этом случае можно определить исходную функцию, которая задается извне и является объединяющим отношением между инновационным пространством и окружающими его объектами-системами. Таким исходным отношением для инновационного пространства, в соответствии с представлением об основных функциях инновации и исходя из представления о системных качествах формирующейся постиндустриальной эпохи, является функция изменения или преобразования.

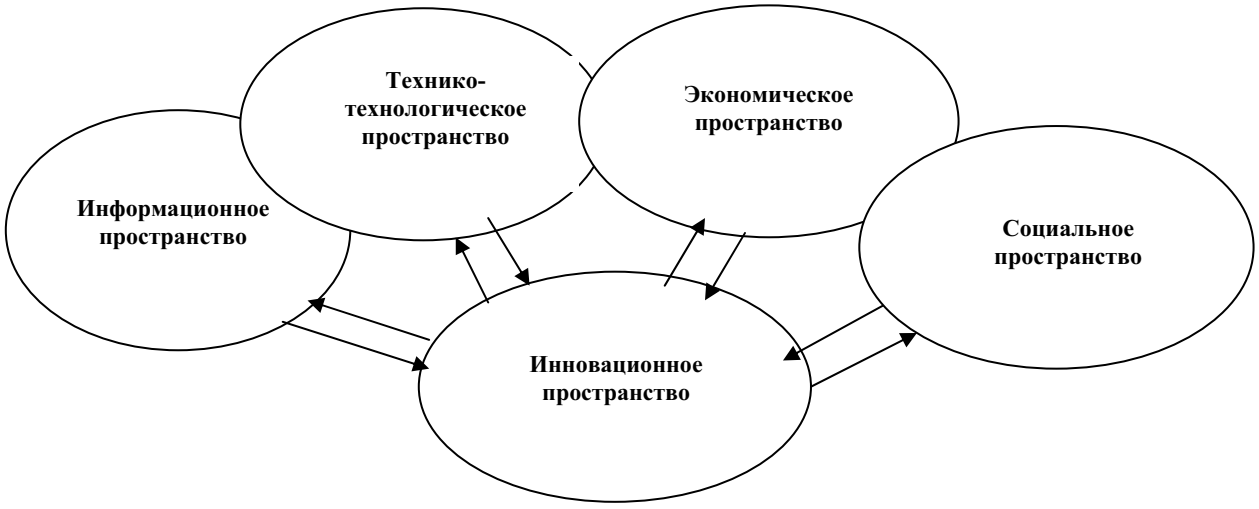


Рис. 2. Инновационное пространство в системе внешних связей

Поскольку инновационное пространство может быть представлено совокупностью объектов, ориентированных на создание, производство и распространение инноваций (как было отмечено выше), то назначение инновационного пространства, его системообразующая функция заключается в такой организации этого множества объектов, при которой становится возможным инновационное преобразование действительности (а следовательно, сопряженных с инновационным пространством информационной, социальной, экономической и прочих составляющих).

Необходимо отметить, что далеко не все объекты окружающей действительности подвержены инновационным изменениям, что говорит не столько о нарушении целостности, сколько о неоднородности инновационного пространства. Неоднородность инновационного пространства есть результат различной восприимчивости к инновациям. Согласно [13], готовность общества воспринимать и реализовывать инновационные решения (степень восприимчивости инноваций) во многом определяется образовательным уровнем создателей и потребителей инноваций, а также уровнем получаемых ими доходов.

Неоднородность инновационного пространства, как правило, выражается в возникновении объектов и систем, более продвинутых в инновационном плане, существовании инновационного разрыва между развитыми и развивающимися государствами. Так, Ю. В. Яковец отмечает: «Волны инновационной активности неравномерно распределены в пространстве, периодически меняются их эпицентры и лидеры инновационной активности. Эпохальные и базисные инновации связаны с крупными вложениями в трансформацию общественных систем и требуют скопления на узком пространстве предпосылок и условий таких взрывов, которые затем распространяются по всему миру. Каждый инновационный переворот имеет свою исходную географическую точку (эпицентр). Инициатором переворота служат одна или несколько лидирующих отраслей, вновь появившихся или радикально трансформированных. В эпицентре могут быть сконцентрированы первоисточники инновационного обновления общества» [14].

В целом, явление неоднородности инновационного пространства не противоречит пространственному принципу, отражающему диалектическое единство непрерывности и прерывности (дискретности), о котором говорилось выше. Поэтому неоднородность инновационного пространства не влияет на характеристику протяженности, которая в соответствии с естественно-научным представлением о пространстве рассматривается как бесконечность.

О бесконечности инновационного пространства-можно также можно судить по глобальному характеру инновационного способа производства, составляющего основу постиндустриальной общественно-экономической формации. В отличие от индустриального способа производства, который сначала охватывал передовые страны, из которых в дальнейшем распространялся на другие страны (экономический империализм), инновационный способ производства не имеет характеристик целостности вне глобальных координат, являясь миросистемным. При инновационном способе производства меняются не только производительные силы, представленные новыми технико-технологическими возможностями и качественно новыми требованиями к субъекту труда, производственные отношения как между субъектами производства, так и между производителями и потребителями инновационного продукта, но также и сами потребители инновационной продукции, так как она изменяет уже не только мир вокруг человека, но и самого человека, вынужденного повышать свой интеллектуальный уровень для овладения технико-технологическими, социальными, управленческими и прочими инновациями [15]. Таким образом, мир изменяется глобальным образом под влиянием инноваций, которые затрагивают практически все социальные слои, все территории, географические объекты земного шара.

Заключение. Подводя итог, можно сделать следующие выводы:

– увеличение масштаба инновационной деятельности, усложнение структуры межкорпорационных, межрегиональных, межотраслевых, межстрановых и прочих объединений, развитие их внутренних и внешних связей в сфере инноваций расширяет пространство инновационной деятельности:

– в настоящее время экономическая наука испытывает недостаток теоретико-методологических инструментов исследования инновационного пространства;

– формирование требуемых теоретико-методологических положений должно опираться на научно обоснованное определение инновационного пространства, специфичность которого требует использования совокупности пространственных и системных принципов, позволяя раскрыть функциональное назначение, внутреннее устройство и характерные свойства данной экономической категории;

– инновационное пространство – это основанная на социально-экономических отношениях системная форма организации объектов инновационной деятельности, направленная на инновационное преобразование действительности, имеющая определенную структуру и конфигурацию, соответствующую им территориальную протяженность и подверженная периодическому инновационному обновлению в результате движения во времени.

Предложенное определение категории «инновационное пространство» включает в себя принцип неразрывности пространства–материи, представление о функциональном назначении, внутреннем устройстве и внешнем очертании инновационного пространства, а также подчеркивает имманентность временнóго фактора инновационному пространству, что соответствует циклическим воззрениям основоположника инноватики Н. Д. Кондратьева, доказавшего важность времени как самостоятельной экономической категории.

Библиографические ссылки

1. Философский энциклопедический словарь / гл. ред. Л. Ф. Ильичев, П. Н. Федосеев [и др.]. М. : Сов. энциклопедия, 1983. С. 541.

2. Эйнштейн А. Относительность и проблема пространства. М. : Мир и физика, 2003. С. 251.

3. Румянцев А. А. Основные свойства и проблемные поля научно-инновационного пространства региона // Пространственная экономика. 2013. № 2. С. 103–117.

4. Бендь А. С. Инновационная среда региона: структура, организация, управление : автореф. дис. … канд. экон. наук : 08.00.05. Волгоград, 2006. 24 с.

5. Гойло В. С. Политическая экономия интеллектуального труда // Мировая экономика и международные отношения. 1994. № 11. С. 137–146.

6. Семенов А. В. Общая характеристика элементов и факторов инновационной среды // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2011. № 132. С. 198–202.

7. Алтухов В. Л. Логика человеко-мироустроения. М. : «Спутник». 2003. 97 с.

8. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. Сер. «Синергетика: от прошлого к будущему». Изд. 3. М. : УРСС, 2003. 288 с.

9. Флоренский П. А. Анализ пространственности и времени в художественно-изобразительных произведениях. Статьи и исследования по истории философии искусства и археологии. М. : Мысль, 2000. С. 110.

10. Философская энциклопедия. Сер. «Электронная библиотека ДМ». Т. 67. CD-ROM. Директмедиа Паблишинг, 2006. 20 400 с.

11. Михнева С. Г. Интеллектуализация экономики: инновационное производство и человеческий капитал // Инновации. 2003. № 1. С. 37–48.

12. Мельников О. Н. «Интеллектуализация» экономического продукта // Креативная экономика. 2007. № 9 (9). С. 60–66.

13. Семенов А. В. Основные факторы и свойства инновационной среды [Электронный ресурс] // Российское предпринимательство. 2012. № 18 (240). С. 54–59. URL: http://www.creativeconomy.ru/articles/25074/ (дата обращения: 04.05.2015).

14. Яковец Ю. В. Глобальные экономические трансформации XXI века. М. : Экономика, 2011. 382 с.

15. Лячин В. И., Лукьянова А. А. Воспроизводственная функция оборонно-промышленного комплекса (ОПК): смена парадигмы // Вестник СибГАУ. 2008. № 4 (21), С. 191–194.

References

1. Ilyichov L. F., Fedoseev P. N. *Filosovskiy entsyklopedicheskiy slovar* [Encyclopedic dictionary of philosophy]. Moscow, Sov. Encyclopedia Publ., 1983, P. 541.

2. Einstein A. *Otnositelnost i problema prostranstva* [Relativity and the problem of space]. Moscow, Mir i fizika Publ., 2003, 251 p.

3. Rumyantsev A. A. [Key features and problematic field of research and innovation space in the region] *Prostranstvennaya ekonomika.* 2013, No. 2, P. 103–117 (InRuss.).

4. Bend A. S. *Innovatsionnaya sreda regiona: struktura, organizatsiya, upravleniye: avtoref. dis. kand. ekon. nauk* [Innovative environment of the region: the structure, organization, management. Cand. econ. sci. diss.]. Volgograd, Volgograd St. Univ. Publ., 2006, 24 p.

5. Goylo V. S. [The political economy of intellectual labor]. *Mirovaya ekonomika I mezhdunarodnye otnosheniya.* 1994, No. 11, P. 137–146 (In Russ.).

6. Semenov A. V. [General characteristics of the elements and factors of the innovation environment]. *Nauchno-tekhnycheskye vedomosti SPbPU. Ekonomicheskye nauki.* 2011, No. 132, P. 198–202 (In Russ.).

7. Altukhov V. L. *Logika cheloveko-miroustroeniya* [Logic of man-world-arrangement]. Moscow, Kompaniya Sputnik Publ., 2003, 97 p.

8. Kapitsa S. P., Kurdyumov S. P., Malinetskii G. G. *Sinergetyka i prognoz budushego* [Synergetic and forecasts of the future]. Moscow, URSS Publ., 2003, 288 p.

9. Florensky P. A. [The analysis of spatiality and time in art-visual works]. *Stat'i i issledovaniya po istorii filosofii iskusstva i arkheologii.* [Articles and research on the history of philosophy of art and archaeology]. Moscow, Mysl Publ., 2000, 110 p.

10. *Filosovskaya entsyklopedia. Seriya: Elektronnaya biblioteka DM* [Encyclopedia of philosophy. Series: Electronic library]. Vol. 67; (CD-ROM) DirectMedia Publishing, 2006, 20 400 p.

11. Mihneva S. G. [Intellectualization of the economy: innovative production and human capital]. *Innovation.* 2003, No. 1, P. 37–48 (In Russ.).

12. Melnikov O. N. [Intellectualization of economic product]. *Kreativnaya ekonomika.* 2007, No. 9 (9), P. 60–66 (In Russ.).

13. Semenov V. A. [The main factors and features of the innovation environment]. *Rossiyskoye predprinimatel'stvo*. 2012, No. 18 (240). P. 54–59. (In Russ.). Available at: http://www.creativeconomy.ru/articles/25074/ (accessed 04.09.2015).

14. Yakovets Yu. V. *Global'nye ekonomycheskye transformatsii XXI veka* [The Global economic transformation of the XXI century]. Moscow, Ekonomika Publ., 2011, 382 p.

15. Lachin V. I., Lukyanova A. A. [The reproductive function of the military-industrial complex (MIC): a paradigm shift]. *Vestnik SibGAU.* 2008, No. 4 (21), P. 191–194 (In Russ.).

© Воейкова О. Б., Лячин В. И., 2015

УДК 338.28

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1022–1028

ИНСТРУМЕНТЫ ОЦЕНКИ И ПЛАНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА, СТИМУЛИРУЮЩИЕ ПРЕХОД ИЗ ЛАТЕНТНОГО СОСТОЯНИЯ В ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ОБОРОТ

Т. В. Зеленская[1], А. А. Кузнецов[2*], А. В. Медведев[2]

[1]Правительство Красноярского края
Российская Федерация, 660009, г. Красноярск, просп. Мира, 110
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

Новая шестая технологическая кондратьевская волна (К-волна) накладывается на начало новой институциональной волны (И-волна), ориентированной на использование творческого человеческого потенциала, экологически сберегающей экономики. Важнейшие компоненты успешного формирования К-волны и И-волны – прежде всего инфраструктура знаний и информационных сетей и модернизированная экономика, наличие в ней высокотехнологичного ядра. В настоящее время в Российской Федерации первостепенной является задача формирования вышеназванных элементов инфраструктуры. При этом ключевой является проблема выхода из латентного состояния субъектов реального сектора экономики и создание тесной связи новых площадок инфраструктуры и высокотехнологичных, наукоёмких инновационных компаний с реальной капитализацией объектов интеллектуальной собственности и включением их в рыночный «товарный оборот». Рассмотрены пути конвертации объектов интеллектуальной собственности в товар и рассмотрены методы оценки интеллектуального капитала. Выделены такие методы оценки интеллектуального капитала, как оценка стоимости товарного знака, бренда, патента, договора на передачу ноу-хау. Описаны методы, позволяющие определить величину интеллектуального капитала в целом, без учета стоимости отдельных его элементов, а именно: метод рыночной капитализации, расчет коэффициента Тобина. А также предложено измерение величины интеллектуального капитала на основе информационной производительности. Результаты применения методов оценки объектов интеллектуальной собственности становятся опорной информационной базой при инвестиционном анализе и подтверждении реальной стоимости нематериального актива на базе оценок элементов интеллектуального капитала, снижая, тем самым, неопределенность в капитализации активов компании, и, соответственно, стоимость произведенного интеллектуального капитала становится очевидной и готовой для введения в рыночный оборот. Предприятия ракетно-космической промышленности являются локомотивом инновационного развития российской экономики, поэтому проблема оценки и планирования интеллектуального капитала напрямую связана с их деятельностью.

Ключевые слова: инновации, объект интеллектуальной собственности, инфраструктура, высокотехнологичный, наукоемкий, интеллектуальный капитал, капитализация активов.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1022–1028

INTELLECTUAL CAPITAL ASSESSMENT AND PLANNING TOOLS, STIMULATING TRANSITION FROM A LATENT STATE TO THE ECONOMIC TURNOVER

T. V. Zelenskaya[1], A. A. Kuznetsov[2*], A. V. Medvedev[2]

[1]The Government of Krasnoyarsk Krai
110, Mira Av., Krasnoyarsk, 660009, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

A new technological sixth Kondratiev wave (K-wave) is superimposed on the beginning of the new institutional wave (I-wave), based on the use of creative human potential, eco-storage Economics. The most important components of K-waves and I-waves successful formation first of all are the knowledge infrastructure and information networks, and modernized the economy, the presence of high-tech core. Now in the Russian Federation the primary task is to form the above-mentioned elements of infrastructure. The key is the problem of exit from "latent" status of the economy real sector subjects and the close links establishment of new sites infrastructure and high-tech, science-intensive, innovative

companies with a real capitalization of intellectual property objects and their inclusion in market "goods turnover". In the article the ways of conversion of intellectual property in the goods and the intellectual capital evaluation methods are considered. In the article the intellectual capital estimation methods are selected as a trademark, brand, patent, contracts on know-how transfer valuation. The authors described methods to determine the intellectual capital value as a whole, excluding the cost of its individual elements, namely: the market capitalization method; the Tobin coefficient calculation. The intellectual capital value measurement on the basis of information productivity is proposed. The results of intellectual property evaluation methods application becomes the reference information base for the investment analysis and the intangible asset real value confirmation on the basis of the intellectual capital elements evaluations, reducing thus the uncertainty in the company assets capitalization and, accordingly, the intellectual capital value becomes apparent and ready for introduction on the market turnover. The rocket and space industry enterprises are the driving force of the Russian economy innovative development, so the intellectual capital assessment and planning problem is directly connected with their activities.

Keywords: innovations, intellectual property, infrastructure, high-tech, knowledge-based, intellectual capital, capitalization of assets.

Введение. Большинство стран с начала текущего столетия проходят достаточно интенсивный период подготовки к новой технологической волне. Новая шестая технологическая кондратьевская волна (К-волна), ориентированная на медицину, био-, генно- и нанотехнолгии, новые квантовые принципы работы компьютеров, новую энергетику, новые и композиционные материалы, накладывается на начало новой институциональной волны (И-волна), ориентированной на использование творческого человеческого потенциала, экологически сберегающей экономики [1]. Отметим, что К-волны проходят латентный период, занимающий 15–20 лет. Именно тогда закладывается и постепенно актуализируется потенциал. Важнейшие компоненты успешного формирования К-волны и И-волны, как считают исследователи А. Клепач и Г. Куранов, следующие: качественное образование; наличие современных университетов и технологических центров по типу Физтеха и МИФТ 50-х годов прошлого столетия; развитая инфраструктура, не только транспортная, но и прежде всего знаний и информационных сетей; модернизированная экономика, наличие в ней высокотехнологичного ядра.

В российской экономике таким высокотехнологичным ядром являются предприятия ракетно-космической промышленности. Тенденции их развития в последнее десятилетие свидетельствуют о том, что предприятия РКП были и остаются локомотивом инновационного развития всех отраслей народного хозяйства. Проблема оценки и планирования интеллектуального капитала напрямую связана с деятельностью предприятий ракетно-космической промышленности.

Проблемы инновационного развития. На сегодняшний день нет сомнений, что Российская Федерация находится в латентном периоде закладывания потенциала экономики, и первостепенной является задача формирования вышеназванных элементов инфраструктуры. Базовые основы заложены как в сфере экономической политики, так и в нормативно-правовой системе и, соответственно, продолжают свое развитие, продиктованное динамично меняющимися экономическими условиями.

Например, как указывается в документе под названием «Основные направления налоговой политики на 2015 год и плановый период 2016 и 2017 годов» (одобрены Правительством РФ 01.07.2014), перспективы экономического роста в среднесрочном периоде в значительной степени зависят от скорости и последовательности реализации необходимых структурных преобразований и способности экономики преодолевать внутренние инфраструктурные и ресурсные ограничения, связанные в том числе с неблагоприятными демографическими тенденциями [2]. Основным источником экономического роста в среднесрочной перспективе должно стать повышение производительности труда, что невозможно без восстановления инвестиционной активности. Ключевыми условиями для преодоления спада инвестиций являются снижение экономической неопределенности, в том числе за счет достижения низкой и стабильной инфляции, и улучшение делового климата [2].

Анализ нормативно-правовой базы инфраструктурных основ экономики показывает её фундаментальную законченность. Заложены условия для формирования индустриальных (промышленных) парков, кластерной политики, политики формирования особых экономических зон. Еще один шаг – создание территорий опережающего развития согласно 473-ФЗ «О территориях опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации» [3–5].

При общих экономических и правовых тенденциях поддержки государством нарождающейся новой экономики и развитии специальной инфраструктуры ключевой является проблема выхода из латентного состояния субъектов реального сектора экономики и создание тесной связи новых площадок инфраструктуры и высокотехнологичных, наукоёмких инновационных компаний [6; 7], так называемых новых элементов, возникающих в период этих циклов обновления экономики, с их реальной капитализацией и включением в рыночный «товарный оборот». Особенно это важно в период переживания экономикой условий повышенных политических и экономических рисков 2014–2015 гг.

Среди проблем, которые приходится решать данным компаниям, можно обозначить следующие: сложность привлечения инвесторов; заключение соглашений в период действия санкций; реализация и капитализация созданных инноваций в сложившихся экономических условиях; особенности оценки отдельных объектов интеллектуальной собственности.

Конвертация интеллектуальной собственности в товар. Решение вышеназванных проблем начинается с защищенности патентом полезной модели, торговой марки, конструкции, авторских прав или сопутствующих прав. Такая защищенность часто является хорошим индикатором потенциала предприятия для осуществления операций на рынке. Даже понятие «инновация» столь широко используется в разных трактовках, что очень тяжело уловить смысл, особенно если инновацию необходимо финансировать. Сегодня действуют различные формы поддержки инновационной деятельности, а финансовые и экономические службы рассматривают инновацию и сумму, на которую считается субсидия, по формальному признаку, документально подтвержденными затратами на исполнение. Порой очень сложно установить реальный эффект от инновации.

Что такое инновация в конкретном образце, производственном процессе или приборе? Каким образом она оценена? По каким признакам установить организационную инновацию, как посчитать затраты интеллектуального труда специалистов, и с какой периодичностью эти затраты возникают, даже если это индивидуальная инновация? Как обстоят дела с инновациями в реальном секторе экономики и наукоемких отраслях? Эти реперные точки процессов влияния инновационной экономики на реальный валовой продукт весьма болезненны и порой «размыты» в конечном финансовом результате деятельности компании [8].

Правительства в государствах Европейского союза, Японии, США поощряют и поддерживают начинания предприятий в области высоких технологий посредством грантов, гарантий, субсидий и/или ссуд на льготных условиях, предоставляемых различными финансовыми фондами и банками, которые прямо или косвенно признают важность интеллектуальных активов. Все это свидетельствует о том, что в период с 2010–2015 гг. интеллектуальная собственность стала конвертируемым товаром. Существует несколько способов достижения подобного результата. Так, интеллектуальная собственность может быть продана, лицензирована, использована в качестве залога при кредитовании, или же может послужить дополнительным основанием для привлечения первоначального акционерного капитала.

Согласно ст. 1225 части четвертой Гражданского кодекса РФ (ГК РФ), результатами интеллектуальной деятельности и приравненными к ним средствами индивидуализации юридических лиц, товаров, работ, услуг и предприятий, которым предоставляется правовая охрана, т. е. интеллектуальной собственностью, являются произведения науки, литературы и искусства; программы для электронных вычислительных машин; базы данных; исполнения; фонограммы; сообщение в эфир или по кабелю радио или телепередач (вещание организаций эфирного или кабельного вещания); изобретения; полезные модели; промышленные образцы; селекционные достижения; топологии интегральных микросхем; секреты производства (ноу-хау); фирменные наименования; товарные знаки и знаки обслуживания; наименования мест происхождения товаров; коммерческие обозначения [9].

В настоящее время, когда основные средства большинства отечественных предприятий устарели и не представляют интереса в качестве возможного обеспечения обязательств, именно исключительные права могут привлечь внимание значительного числа потенциальных кредиторов [10]. Данный вид залога достаточно гибок, он дает возможность найти оптимальный вариант в каждом отдельном случае и обеспечить совмещение прав кредиторов с возможностью залогодателя эффективно использовать предмет залога в своей производственно-хозяйственной деятельности [11–13].

Как правило, кредит под залог прав на объекты интеллектуальной собственности необходим правообладателям для обеспечения полного объема финансирования затрат на опытно-конструкторскую доработку, доведение изобретений и других объектов промышленной собственности до стадии внедрения. Но сегодня разумнее говорить о кредите под залог уже реализованных и приносящих прибыль объектов интеллектуальной собственности. То есть актив должен «работать» и приносить прибыль.

В случае принятия решения о кредитовании юридического лица под залог исключительных прав возможно возникновение ряда проблем: во-первых, трудно произвести адекватную оценку стоимости актива для целей залога; во-вторых, вероятны сложности с дальнейшей реализацией предмета залога, поскольку рынок объектов интеллектуальной собственности гораздо более ограничен, чем рынок недвижимости или оборудования. Нельзя исключить обесценивание предмета залога.

Методы оценки объектов интеллектуальной собственности. При оценке товарного знака, приобретаемого предприятием у другой фирмы, предпочтительно использовать доходный подход, а именно, метод преимущества в прибыли. Для этого достаточно рассчитать прирост чистого дохода предприятия вследствие увеличения цены и расширения рынка сбыта и вычесть дополнительные расходы на удовлетворение требований обладателя товарного знака. Стоимость товарного знака совпадает с преимуществом в прибыли. Преимущество в прибыли определяется только в первый год использования товарного знака, так как в дальнейшем фирма-покупатель уже сама будет работать на товарный знак, т. е. увеличивать (в лучшем случае) или уменьшать его стоимость [14; 15].

Методы затратного подхода, как правило, показывают стоимость объекта оценки с позиций прошлых или настоящих затрат на создание оцениваемого объекта интеллектуальной собственности или приобретение замещающего аналогичного по назначению и выполняемым функциям объекта. Это в полной мере относится и к товарным знакам. Если оценка производится не в момент создания товарного знака, то все затраты необходимо привести к текущей стоимости.

При оценке бренда затратный подход является самым простым способом, предусматривающим учет затрат на его создание и поддержание [2]. Поскольку средства могут тратиться неэффективно, этот показатель достаточно условен. Сравнительный подход опирается на два аналогичных продукта, а именно,

брендовый и не имеющий бренда. Вычисляется прибыль, полученная от продажи этих товаров за какой-то период времени, или прибыль за определенное количество штук. Прибыль от небрендового товара вычитается из прибыли от товара брендового. Эта разница и есть стоимость бренда. Естественно, не всегда можно найти аналогичный безбрендовый товар. Тогда в расчетах учитывается влияние внешних рыночных факторов, например, прибыльность данного сектора рынка. Доходный подход предполагает составление двух вариантов прогноза результатов деятельности компании. Один исходит из наличия бренда, другой – из его отсутствия. Разница и есть эффект наличия бренда или его ценность для действующего предприятия.

Важна оценка договора на передачу ноу-хау, так как ноу-хау имеет реальную ценность только в случае надежной защиты его от раскрытия. Поэтому расчет стоимости ноу-хау имеет смысл основывать на использовании прибыли за несколько лет. Для оценки ноу-хау можно применять метод роялти. Однако при расчете следует уточнить, что предполагается оценка патента на технологию. Патент предполагает передачу права собственности, тогда как лицензия разрешает использование нематериального актива на определенный в ней срок и не предполагает перехода права собственности.

Проблема определения платежей за использование ноу-хау заключается в том, что для его внедрения в производство требуются инвестиции. Чистый доход от использования ноу-хау или изобретения является частью чистого дохода от реализации инвестиционного проекта. Поэтому сначала разрабатывается инвестиционный проект, составляется бизнес-план, в котором рассчитывают ожидаемый ежегодный чистый доход. Затем выделяют ту часть чистого дохода, которую можно отнести к используемому объекту интеллектуальной собственности. Применяемый для расчета долевой коэффициент определяется с учетом фактора получения экономии. Вот эта составляющая и создает условия для расчета и закладывания в планы фирмы мотивационных КПЭ [16; 17].

Так, применение ноу-хау или изобретения дает прирост чистого дохода предприятия за счет таких факторов, как снижение себестоимости продукции, увеличение объема продаж, увеличение цены за продукцию за счет роста качества, снижение налога на прибыль. Далее надо решить, какая часть рассчитанного дохода пойдет в оплату обладателю (автору) ноу-хау или изобретения. Вот эта величина и будет использована в формуле как чистый доход. Особое внимание следует обратить на выбор ставки дисконта. Обычно ставка дисконта складывается из безрисковой ставки и премии за риск. Когда оцениваются объекты интеллектуальной собственности, премия за риск выбирается повышенной, так как вложения в эти объекты отличаются большой рискованностью.

Срок полезного применения объекта интеллектуальной собственности оценивается предприятием самостоятельно и зависит от сроков старения передаваемых знаний (опыта) и возможного раскрытия их конфиденциальности. Этот период соответствует 20-летнему периоду действия патента РФ на изобретение. При определении срока действия договора на передачу ноу-хау в международной практике принятым считается срок, равный пяти годам, а по отдельным договорам он изменяется в пределах от двух до десяти лет.

В границах теории оценки интеллектуального капитала существуют методы, позволяющие определить величину интеллектуального капитала в целом, без учета стоимости отдельных его элементов, а именно [2]:

1. Метод рыночной капитализации; стоимость интеллектуального капитала равна разнице между рыночной ценой предприятия и балансовой стоимостью его материальных активов.

2. Коэффициент Тобина; он выражает отношение рыночной стоимости компании к балансовой стоимости ее чистых активов:

$$q' = \frac{V}{\text{А}\div},$$

где V – рыночная стоимость акций компании; Ач – стоимость чистых активов предприятия. При этом, если $q' < 1$, интеллектуальный капитал предприятия представляет собой отрицательную величину. Это значит, что с точки зрения рынка предприятие стоит дешевле, чем активы, которыми оно обладает, и в случае его ликвидации на данный момент будет терпеть убытки; $q' > 1$, предприятие обладает положительным по своей величине интеллектуальным капиталом; $q' = 1$, интеллектуальный капитал равен нулю, т. е. рынок оценивает стоимость предприятия в величину, равную стоимости его собственных средств.

Кроме этого, коэффициент q может характеризовать степень эквивалентности и выгодности товарного обмена. Например, при $q = 2$, когда рыночная стоимость предприятия вдвое дороже стоимости его гипотетической замены, оно извлекает из этого вида собственности выгоду выше средней в этом виде деятельности. В этом смысле q является показателем способности предприятия получать более высокую прибыль благодаря тому, что у него есть нечто такое, чего нет у других: квалификация сотрудников, отношения с клиентской сетью и т. п. Это и есть ощутимое проявление неучтенных, неидентифицированных нематериальных ресурсов компании, создающих дополнительную стоимость.

Сам Д. Тобин объяснял разрыв между этими величинами несовпадением политики капитализации и амортизации основных фондов: если оборудование продолжает работать, здания продолжают эксплуатироваться после того, как их стоимость полностью амортизирована, то $q > 1$, а если предприятие приобретает в кредит новое оборудование, то $q < 1$ [18].

Измерение величины интеллектуального капитала на основе информационной производительности. Для характеристики любых интеллектуальных действий, совершаемых в процессе управления предприятием (переговоры, планирование, заключение контрактов и т. д.), используется понятие «информационный менеджмент». В качестве меры измерения эффективности предлагается использовать ROM (Return On Management), который определяется

отношением дохода, добавленного информацией, к издержкам информационного менеджмента [18; 19].

Для того чтобы определить эту величину, необходимо рассчитать:

1) издержки информационного менеджмента, которые складываются из издержек по реализации услуг, управлению фирмой, расходов на исследования и развитие и т. п., но не включают затраты, связанные непосредственно с производством продукции и услуг;

2) доход, добавленный интеллектуальным капиталом, т. е. избыточный доход, получаемый вследствие высокой доходности капитала.

Часть чистого дохода, относимая на интеллектуальные ресурсы, определяется как разница между прибылью предприятия и средним доходом, который рассчитывается исходя из стоимости его активов и средней процентной ставки, характеризующей среднюю доходность капитала. При этом весь избыток чистого дохода над его средним уровнем может быть отнесен к эффекту информационного менеджмента. Оценка части чистого дохода предприятия, относимой непосредственно на вклад интеллектуального капитала, позволяет рассчитать методом дисконтирования его стоимость [19].

Стоит заметить, что подобным образом определяется стоимость деловой репутации методом избыточных прибылей. Разница состоит лишь в том, что избыток чистого дохода над его средним уровнем (по отрасли) в данном случае дисконтируется, а не капитализируется.

Заключение. При оценке инвестиционным институтом или банком инвестиционного проекта наукоемкой компании, при доведении КПЭ на предприятии и формализации их применения, результаты применения методов оценки объектов интеллектуальной собственности становятся опорной информационной базой при инвестиционном анализе и подтверждении реальной стоимости нематериального актива на базе оценок элементов интеллектуального капитала, снижая тем самым неопределенность в капитализации активов компании, и, соответственно, стоимость произведенного интеллектуального капитала становится очевидной и готовой для введения в рыночный оборот. Тем более что ключевыми условиями для преодоления инвестиционного спада в экономике являются снижение экономической неопределенности, в том числе за счет достижения низкой и стабильной инфляции, и улучшение делового климата на предприятиях за счет введения нематериальных активов в рыночный оборот.

Библиографические ссылки

1. Клепач А. Н., Куранов Г. О. О циклических волнах в развитии экономики США и России // Вопросы экономики. 2013. № 11. С. 4–33.

2. Бромбер Г. В. Интеллектуальная собственность. Основной курс : учеб. пособие. М. : Приор-издат, 2004. 464 с.

3. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 05.08.2000 № 117-ФЗ (ред. от 29.06.2015 [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_19671/ (дата обращения: 01.08.2015).

4. Требования к индустриальным паркам и управляющим компаниям индустриальных парков : постановление Правительства РФ от 4.08.2015 г. № 794 [Электронный ресурс]. URL: http://pravo.gov.ru/laws/acts/62/555752.html (дата обращения: 17.08.2015).

5. Об утверждении правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским организациям – управляющим компаниям индустриальных (промышленных) парков и (или) технопарков на возмещение части затрат на уплату процентов по кредитам, полученным в российских кредитных организациях и Государственной корпорации «Банк развития и внешнеэкономической деятельности (Внешэкономбанк)» в 2013–2016 годах на реализацию инвестиционных проектов создания объектов индустриальных (промышленных) парков и (или) технопарков, в рамках подпрограммы «Индустриальные парки» Государственной программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» : постановление Правительства РФ от 11.08.2015 № 831 [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_184363 (дата обращения: 20.08.2015).

6. Об отборе субъектов Российской Федерации, имеющих право на получение государственной поддержки в форме субсидий на возмещение затрат на создание инфраструктуры индустриальных парков и технопарков : постановление Правительства РФ от 30.10.2014 № 1119 [Электронный ресурс]. URL: http://www.rg.ru/2014/11/08/poddergka-site-dok.html (дата обращения: 20.08.2015).

7. О предоставлении и распределении субсидий из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации на государственную поддержку малого и среднего предпринимательства, включая крестьянские (фермерские) хозяйства : постановление Правительства РФ от 30 декабря 2014 г. № 1605 [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173683/ (дата обращения: 20.08.2015).

8. Глухов В. В., Коробко С. Б., Маринина Т. В. Экономика знаний. СПб. : Питер, 2003. 528 с.

9. Гражданский кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]. Ст. 1225. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_9027 (дата обращения: 07.08.2015).

10. Райзберг Б. А., Лозовский Л. Ш., Стародубцева Е. Б. Современный экономический словарь. 6-е изд. М. : Инфра-М, 2011. 495 с.

11. Об обязательных нормативах банков : инструкция Банка России от 03.12.2012 № 139-И [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139494/ (дата обращения: 07.08.2015).

12. О Методических рекомендациях по реализации подхода к расчету кредитного риска на основе внутренних рейтингов банков : письмо Банка России от 29.12.2012 № 192-Т [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140871 (дата обращения: 09.08.2015).

13. Положение о порядке предоставления Банком России кредитным организациям кредитов, обеспеченных активами или поручительствами : утв. Банком России 12.11.2007 № 312-П [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_73508/ (дата обращения: 10.08.2015).

14. Об утверждении Федерального стандарта оценки «Оценка нематериальных активов и интеллектуальной собственности» : приказ Минэкономразвития России от 22.06.2015 № 385 [Электронный ресурс]. URL: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=181621;frame=1 (дата обращения: 11.08.2015).

15. О промышленной политике в Российской Федерации : фед. закон РФ от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: http://www.rg.ru/2015/01/12/promyshlennost-dok.html (дата обращения: 17.08.2015).

16. Положение об интеллектуальной собственности ОАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]. М. URL: http://www.fsk-ees.ru/media/File/innovations/Polozhenie_intellect.pdf (дата обращения: 10.08.2015).

17. Методические указания по применению ключевых показателей эффективности государственными корпорациями, государственными компаниями, государственными унитарными предприятиями, а также хозяйственными обществами, в уставном капитале которых доля участия Российской Федерации, субъекта Российской Федерации в совокупности превышает пятьдесят процентов, разработанные Министерством экономического развития по итогам Петербургского международного экономического форума от 5 июля 2013 г. № Пр-1474. [Электронный ресурс]. URL: http://www.commim.spb.ru/dejatelnost/gosudarstvennym_organizacijam/metod_ukaz_kluch_pokaz (дата обращения: 07.08.2015).

18. O'Donnel D., Henriksen L. B. and Vorlpel S. C. Becoming critical on intellectual capital // Journal of Intellectual Capital. 2006. № 7.

19. Luthy D. Intellectual Capital and its Measurement // Asian Pacific Interdisciplinary Research in Accounting Conference (APIRA). Osaka, 1996.

References

1. Klepach A. N., Kuranov G. O. [Cyclic waves in the economic development of the USA and Russia]. *Voprosy ekonomiki.* 2013, No. 11, P 4–33 (In Russ.).

2. Bromber G. V. *Intellektual'naya sobstvennost'*. [Intellectual property]. Moscow, Prior-izdat Publ., 2004, 464 p. (In Russ.).

3. *Nalogovyy kodeks Rossiyskoy Federatsii (chast' vtoraya) ot 05.08.2000 N 117-FZ (red. ot 29.06.2015* [The Tax Code of the Russian Federation (Part Two) from 05.08.2000 N 117-FZ (ed. From 06/29/2015]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_19671/ (In Russ.) (accessed 01.08.2015).

4. RF Government Resolution of 4.08. 2015 № 794 "Requirements for industrial parks and industrial parks management companies" (In Russ.). Available at: http://pravo.gov.ru/laws/acts/62/555752.html (accessed 17.08.2015).

5. Government Decree of 11.08.2015 № 831 "On approval of rules for granting subsidies from the federal budget of the Russian organizations – managing companies of industrial (industrial) parks and (or) industrial parks for reimbursement of the cost of interest on loans obtained in Russian credit institutions and the State Corporation "Bank for Development and Foreign Economic Affairs (Vnesheconombank)" in 2013–2016 for implementation of investment projects for the creation of objects of industrial (industrial) parks and (or) industrial parks, under the sub-program "Industrial Parks" State Program "Development of the industry and increase its competitiveness" (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_184363 (accessed 20.08.2015).

6. Government Decree of 30.10.2014 №1119 "On the selection of subjects of the Russian Federation have the rights to receive state support in the form of subsidies for reimbursement of infrastructure industrial parks and industrial parks" (In Russ.). Available at: http://www.rg.ru/2014/11/08/poddergka-site-dok.html (accessed 20.08.2015).

7. Government Resolution of December 30. 2014 N 1605 "On the provision and distribution of subsidies from the federal budget to the budgets of subjects of the Russian Federation for the state support of small and medium-sized businesses, including peasant (farmer's) economy" (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173683. (accessed 20.08.2015).

8. Glukhov V. V., Korobko S. B., Marinina T. V. *Ekonomika znaniy*. [Knowledge economy]. St. Petersburg, Piter Publ., 2003, 528 p.

9. *Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii st. 1225* [Russian Civil Code Art. 1225]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_9027 (accessed 07.08.2015).

10. Rayzberg B. A., Lozovskiy L. S., Starodubtseva E. B. *Sovremennyy ekonomicheskiy slovar'* [Modern Dictionary of Economics]. Moscow, Infra-M Publ., 2011, 495 p.

11. Instruction of Bank of Russia from 03.12.2012 N 139-I "On Banks' Required Ratios". Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_139494 (accessed 07.08.2015).

12. Letter from the Bank of Russia from 29.12.2012 N 192-T "On the Guidelines for the implementation of the approach to the calculation of credit risk based on the internal ratings of banks". Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140871. (accessed 09.08.2015).

13. Regulations on the procedure of the Bank of Russia to credit institutions loans secured by assets or guarantees (app. Bank of Russia 12.11.2007 N 312-P). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_73508/ (accessed 10.08.2015).

14. Order of the Ministry of Economic Development of Russia from 22.06.2015 N 385 "On approval of the Federal evaluation standard" Valuation of intangible assets and intellectual property". Available at: http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=181621;frame=1 (accessed 11.08.2015).

15. RF Federal Law of December 31, 2014 N 488-FZ "On industrial policy in the Russian Federation".

Available at: http://www.rg.ru/2015/01/12/promyshlennost-dok.html (accessed 17.08.2015).

16. *Polozhenie ob intellektual'noy sobstvennosti OAO "FSK EES" Moskva* [Intellectual property clauses of JSC "FGC UES", Moscow]. Available at: http://www.fsk-ees.ru/media/File/innovations/Polozhenie_intellect.pdf (accessed 10.08.2015).

17. Guidelines for the use of key performance indicators of public corporations, public companies, state unitary enterprises and economic entities in the authorized capital of which the share of the Russian Federation, subject of the Russian Federation in the aggregate more than fifty per cent, developed by the Ministry of Economic Development on the basis of the St. Petersburg International Economic Forum on July 5, 2013 № Pr-1474 (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_19671/ (accessed 01.08.2015).

18. O'Donnel D., Henriksen L. B., Vorlpel S. C. Becoming critical on intellectual capital. Journal of Intellectual Capital. 2006, No. 7.

19. Luthy D. Intellectual Capital and its Measurement. In: Asian Pacific Interdisciplinary Research in Accounting Conference (APIRA). Osaka, 1996.

© Зеленская Т. В., Кузнецов А. А.,
Медведев А. В., 2015

УДК 338.242.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1029–1037

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЛАТФОРМЫ В ИННОВАЦИОННОМ РАЗВИТИИ ТЕРРИТОРИИ

В. В. Куимов[1*], А. О. Куимов[1], Д. А. Толстой[2]

[1]Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
[2]Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89
[*]E-mail: kuimov1945@mail.ru

Современный период, определяемый как переход к постиндустриальному типу развития, усиленный быстрыми темпами глобализации экономики и ее кризисными проявлениями, побуждает как Россию в целом, так и ее регионы искать новые возможности для укрепления инновационных позиций своей экономики и ее конкурентоспособности на внутреннем и мировых рынках и повышения жизненного уровня населения. Одной из таких возможностей выступает сетевое взаимодействие предприятий бизнеса, власти, науки и образования в рамках производственно-территориальных кластеров или технологических платформ, позволяющее полнее концентрировать ресурсы на перспективных направлениях, получать экономический результат и его синергетический эффект.

Анализируются факторы инновационного развития в Красноярском крае, особенности и отдельные преимущества. Обоснована необходимость и возможность деятельности региональных технологических платформ (РТП) как формата соединения ресурсов бизнеса, территории, общественных структур и власти. Показаны общие векторы развития европейских, российских и региональных платформ. Раскрывается практика организации взаимодействия субъектов инновационного развития в рамках технологических платформ, в том числе роль и место общественно-профессиональных структур, на примере ассоциации «Сибирский научно-образовательный консорциум». Показаны формы объединения РТП и реальные проекты, реализуемые в кооперационном взаимодействии. Наиболее плодотворно региональные технологические платформы проявляют себя на направлении информационно-телекоммуникационных и космических технологий для инновационного развития Сибири как составная часть аналогичной федеральной технологической платформы. На основе анализа рассматривается стратегический вектор инновационного развития региона как включение основных отраслей экономики в реализацию глобальных проектов Азия–Сибирь–Европа.

Ключевые слова: инновационное развитие, кластеры, региональные технологические платформы (РТП), проекты РТП, глобальные проекты, коммерциализация.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1029–1037

REGIONAL TECHNOLOGY PLATFORMS OF THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF TERRITORIES

V. V. Kuimov[1*], A. O. Kuimov[1] , D. A. Tolstoy[2]

[1]Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
[2]Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev
89, Ada Lebedevs St., Krasnoyarsk, 6600049, Russian Federation
[*]E-mail:kuimov1945@mail.ru

The modern period, defined as the transition to a post-industrial type of development, enhanced rapid globalization of the economy and its crisis manifestations encourages as Russia as a whole and its regions seek new opportunities to strengthen the innovative products of its economy and its competitiveness in domestic and global markets and increase living standards. One of these possibilities is networking business enterprises, government, science and education in the framework of production and regional clusters or regional technological platforms, enabling better to concentrate resources on promising directions to obtain economic results and its synergistic effect.

The paper analyzes the factors of innovative development in the Krasnoyarsk region, features and individual advantages. The necessity and the possibility of activity regional technology platforms as a connection format business

resources, territory, public bodies and authorities are considered. The general direction of development of European, Russian and regional platforms is shown. It expands the practice of interaction of subjects of innovative development of the technology platforms, including the role and place of social and professional structures on the example of the Association "Siberian Research and Education Consortium". RTP forms of association and real projects in cooperative interaction are shown. The most fruitful regional technology platforms manifest themselves in the direction of information and telecommunication technologies and space for innovative development of Siberia, as part of the same federal technology platform. On the basis of the analysis a strategic vector of innovative development of the region as the inclusion of the major industries in the global project Asia–Sibir–Evropa is considered.

Keywords: innovative development, clusters, regional technology platforms (RTP) RTP projects, global projects, commercialization.

Введение. Для России, и особенно ее комплексно развитых территорий, практика сосредоточения ресурсов является не новой. Еще в период государственных совнархозов в отдельных территориях, в том числе в Красноярском крае, была сформирована взаимно связанная структура предприятий от разработки сырья до конечного продукта, что в настоящее время может характеризоваться как система промышленных кластеров. Так, на основе одного из главных ресурсов – леса были сформированы цепочки предприятий: заготовка, первичная переработка, глубокая переработка, получение целлюлозы, спирта, производство порохов, шин, химических волокон, искусственного шелка, тканей, бумаги и др. Аналогичные территориально-производственные комплексы были и оправдали себя и на многих других направлениях экономики [1].

Поиск новых возможностей взаимодействия для достижения лучшего результата продолжается в форматах территориальных кластеров, что характерно для ряда регионов России, в практике бюджетного проектирования предусмотрено формирование федеральных и региональных целевых программ, отраслевых программ и др. Непосредственно бизнес ищет возможности взаимодействия путем формирования вертикально интегрированных холдингов и других структур или сетевого взаимодействия. Одним из форматов координации ресурсов стали федеральные технологические платформы (ФТП), а затем в отдельных случаях, как в Красноярском крае, региональные технологические платформы (РТП).

Структура экономики региона и формирование региональных технологических платформ. Для Красноярского края характерным остается комплексное многоотраслевое развитие его отдельных территорий и одновременно моноразвитие отдельных территорий [2]. Так, норильский промышленный район в основном развивает производство цветных металлов – медь, никель, драгоценные и редкоземельные металлы. Для северных территорий характерны очаговые вахтовые поселки нефтегазоразведки и добычи, отдельные поселения местных народов, ведущих охотничий промысел и рыбную ловлю. Средний Север края (Лесосибирск, Енисейск, Нижнее Приангарье) – заготовка и переработка леса, формирование предприятий по добычи сырья и его первичной переработки. Здесь есть необходимая инфраструктура: Богучанская ГЭС, железная и автомобильные дороги [1]. В центре региона сосредоточены высокотехнологичные предприятия оборонного и космического профиля, энергетики, организации науки и образования. В процессе экономических преобразований и приватизации значительная группа предприятий региона вошли в крупные российские или транснациональные корпорации (РУСАЛ, СУЭК, «Балтика» и др.), интересы их развития соотносятся с корпоративной стратегией и слабо связаны с интересами территории размещения. В результате промышленные предприятия региона практически не связаны с технологической цепочкой этих корпораций, не поставляют сюда свою продукцию, слабо связаны с их обслуживанием. Даже продукты питания в основном поставляются в норильский промышленный район, в районы нефтеразведки и добычи из других территорий, в том числе из-за рубежа. Принятые против России санкции и наши ответные меры создают возможность разворота этих крупных корпораций к сотрудничеству с предприятиями региона. В целом инновационные продукты и услуги в регионе и России слабо представлены (табл. 1).

Результаты инновационной активности предприятий и организаций Красноярского края аналогичны средним показателям по России, и, несмотря на принимаемые усилия и активное развитие структур, инновационное развитие отраслей идет медленно.

Как показывают исследования, существенно отличаются по уровню инновационной активности предприятия и организации по формам собственности и видам деятельности (табл. 2).

Таблица 1

Инновационные товары и услуги в РФ в 2010–2012 гг.

Показатели инновационной деятельности	2010 г.	2012 г.
Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации, в общем числе организаций	9,3	9,9
Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	4,9	7,8
Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	1,5	1,8
Удельный вес организаций, имевших научно-исследовательские, проектно-конструкторские подразделения, в общем числе организаций	10,2	10,9

Таблица 2

Инновационная активность организаций по формам собственности за 2012 год

Вид собственности	Сводный уровень	По типам инноваций		
		Технологические	Маркетинговые	Организационные
Государственная федеральная	18,1	16,9	3,0	4,9
Государственная региональная	5,8	4,7	0,7	1,7
Муниципальная	3,1	2,5	0,3	0,7
Частная	11,5	10,2	2,3	3,3
Смешанная с государственной собственностью	19,4	17,4	3,5	6,3
Государственных корпораций	36,6	34,8	5,6	13,0

Для сравнения использованы показатели по предприятиям отраслей, наиболее характерных для Красноярского края: добывающие, обрабатывающие производства; производство и распределение энергии, газа, воды; связь, деятельность, связанная с использованием вычислительной техники и информационных технологий; научные исследования и разработки; предоставление прочих видов услуг. Во всех случаях предприятия регионального и особенно муниципального уровня существенно отстают от аналогичных федеральных или смешанной собственности, и особенно от предприятий государственных корпораций. В целом крайне мало маркетинговых и организационных инноваций. Это при том, что за период с 2007 по 2014 годы на инновационные инфраструктуры государством было потрачено 684,4 млрд руб. федерального и регионального бюджетов. При этом значительные государственные расходы не были поддержаны запланированными объемами внебюджетного финансирования, а рост затрат не сопровождался соответствующим ростом доходов от деятельности объектов инновационной инфраструктуры и увеличением их вклада в экономику [5, с. 4].

В мире чаще всего применяется «спиральный» подход формирования инновационных систем, на основе открытых блоков развития науки, образования, бизнеса, власти и общества. Для этого поддерживаются формирования:

– «организаций-гибридов» – институты развития, предпринимательские университеты, МИПы, исследовательские корпорации и др.;

– каналов обмена – интерфейсы, обеспечивающие обмен и получение информации, капитала, людей, знаний, опыта;

– участников-«акторов» – предпринимательские организации, ассоциации, союзы и др. в форме кластеров, технологических платформ, консорциумов.

На этой основе ускоряется процесс получения конечных инновационных результатов – новых продуктов, технологий, цепочки стоимости, виды деятельности, услуг.

На этом фоне развитие форматов, позволяющих вне зависимости от отраслевой и корпоративной принадлежности объединять ресурсы на заинтересованных для региона, предприятий и организаций направлениях, становится значимым важным элементом взаимодействия и достижения синергетического результата. Особое внимание должно быть направлено на предприятия региональной и муниципальной собственности.

В современной практике для реализации инновационного направления развития используется широкий спектр инструментов (табл. 3).

В резюме отчета о деятельности проектного офиса ОАО «РВК» и Минэкономразвития «Повестка развития инновационной инфраструктуры в Российской Федерации», в Приложении № 3 «Виды объектов инновационной инфраструктуры в Российской Федерации (краткий глоссарий)» [5, с. 22] авторы выделяют 35 видов (терминов) инновационных инфраструктур, в том числе на основе распоряжений Правительства РФ даются два определения технологическим платформам:

– коммуникационный инструмент, направленный на активизацию усилий по созданию перспективных коммерческих технологий, новых продуктов (услуг), привлечение дополнительных ресурсов для проведения исследований и разработок на основе участия всех заинтересованных сторон (бизнеса, науки, государства и гражданского общества), а также на усовершенствование нормативно-правовой базы в области научно-технологического и инновационного развития [6];

– организационные формы реализации государственно-частного партнерства и инструмент осуществления научно-технической и инновационной политики в приоритетных направлениях технологической модернизации региональной экономики [7].

Следует отметить, что приведенные определения технологических платформ отражают только форму ее проявления. Здесь нет отражения их связи с текущим и стратегическим планированием и бюджетированием как в Федерации, так и в регионах. Следует учесть, что используемые в практике долгосрочные целевые программы, отраслевые программы, федеральные целевые и другие формы стратегического развития практически не рассматриваются и не включены в общую систему бюджетирования.

Красноярский край – один из регионов в России, где идет постоянный поиск путей перевода экономики на инновационный путь. В 2008 году в регионе принят закон Красноярского края от 10.07.2008 г. № 6-2000 «О государственной поддержке научной, научно-технической и инновационной деятельности на территории Красноярского края [8], в 2011 году указом Губернатора края утверждена Стратегия инновационного развития Красноярского края на период до 2020 года «Инновационный край – 2020» [9]. Стратегия определяет цели, задачи и направления развития инновационной деятельности в Красноярском крае

и отражает основные положения проекта «Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года». На их основе в регионе нашли развитие региональные технологические платформы по основным направлениям развития экономики края.

В настоящий момент, с разным уровнем успешности в крае сформированы 11 региональных технологических платформ, которые утверждены на Совете по инновационному развитию при Губернаторе края. Красноярские РТП в совокупности объединяют 134 промышленных, научных, образовательных организаций по ключевым направлениям экономики региона: информационно-телекоммуникационные и космические технологии; энергетика, энергоэффективность и энергосбережение; инновационные технологии лесного комплекса; машиностроения; строительного комплекса; металлургии; химического и нефтегазового комплекса; освоения месторождений твердых полезных ископаемых; трансляционная медицина; продовольственная безопасность; образовательные инновационные технологии. Региональные технологические платформы сосредоточены на 52 направлениях и представлены в формате 62 комплексных проектов [10]. На этом этапе развития непосредственными координаторами по формированию и работы РТП выступили университеты и институты в тесном сотрудничестве с наукой, и прежде всего институты КНЦ СО РАН, руководители ведущих предприятий региона, союзы промышленников, предпринимателей, машиностроителей, строителей, малого и среднего бизнеса. Активно участвовали в формировании РТП отраслевые министерства правительства региона. Инструментом соорганизации усилий заинтересованных сторон по развитию РТП как значимой составляющей всей инновационной сети региона стала ассоциация «Сибирский научно-образовательный консорциум». Она учреждена всеми заинтересованными сторонами инновационного процесса, отражает их интересы и выступает за комплексный подход к развитию (рис. 1).

Таблица 3

Механизмы работы с кооперационными проектами в инновационной среде Красноярского края

Механизмы	Направления			Оценка использования
	Регион	Муниципалитеты	Отрасли	
Технологические платформы	+	–	+, –	11 РТП, слабая реализация проектов РТП
Инновационные кластеры	+	–	+	Сформирован Железногорский инновационный кластер
Консорциумы (пром-кластеры)	–	+	+	Реально существуют, формально не оформлены
Профсообщества (союзы, ассоциации)	+	+	+	Одна из активных сторон инновационного развития
Конференции поставщиков	+	+	+	Практикуют отдельные предприятия и регион по отдельным товарам
Инновационная инфраструктура	+	+, –		Развивается краевая, Красноярска и Железногорска, в других тер. МИЦы
Ассоциации	+	–	–	Более 15

Рис. 1. Региональные технологические платформы Красноярского края и ассоциация «Сибирский научно-образовательный консорциум»

Ключевыми задачами ассоциации «СНОК» является содействие расширению и развитию сегмента инновационной экономики Красноярского края на основе эффективной кооперации и интеграции участников региональной инновационной системы (РИС), формирование экспертного сообщества и креативного класса, обеспечивающих региону стратегические роли в новой мировой экономике.

Можно считать, что РТП могут быть эффективной формой организации частно-государственного партнерства, основой формирования промышленных кластеров и координации использования ресурсов для развития важнейших направлений экономики региона.

В крае наряду с РТП реализуются 53 долгосрочных, 16 ведомственных (отраслевых) целевых программ. Большинство этих программ направлены на решение конкретных задач отрасли. К таким относятся: отраслевая программа «Развитие лесного комплекса Красноярского края на 2015–2017 годы» [11], отраслевая программа «Развитие транспорта Красноярского края на 2015–2017 годы» [12], долгосрочная целевая программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Красноярском крае на 2010–2012 годы и на период до 2020 года»; «Развитие системы здравоохранения Красноярского края на 2013–2015 годы» и ряд других целевых и отраслевых программ.

Взаимодействие в рамках РТП осуществляется на основе постоянной координации работы Совета по инновационному развитию при Губернаторе Красноярского края, отраслевых министерства и агентства региона, правлений РТП, Совета ректоров Красноярского края, ассоциации «СНОК».

Для сравнения направлений инновационного развития, на которых сосредоточены современные формы реализации государственно-частного партнерства, сравним перечень и направления инновационных усилий европейских, российских и краевых региональных платформ (табл. 4).

Проведенное сравнение европейских технологических платформ, технологических платформ в РФ и региональных технологических платформ Красноярского края (табл. 4) показывает, что региональные платформы сформированы на ведущих технологических направлениях современного развития. Они отражают общеевропейские и российские тенденции. Одновременно можно выделить особенность всего комплекса РТП региона – они предусматривают более комплексный вариант взаимодействия, прежде всего за счет активного участия вузов, и, соответственно, формирование вокруг РТП и для их реализации проектов нового образовательного пространства, в том числе сетевых научно-образовательных кластеров с активным участием в них студентов, аспирантов, докторантов, групп университетов, и подготовительный этап – сотрудничество со школами, прежде всего производственными и естественно-научными классами, совместная работа с начальным и среднепрофессиональным образованием.

В регионе сложилась структура взаимодействия участников РТП (рис. 2).

Оценки результативности деятельности РТП достаточно противоречивы, и разными авторами отмечаются их различные стороны. Так, анализируя табл. 4, мы отмечаем их высокую транспарентность с направлениями развития в мире, Европе и России. Генеральный директор Российской корпорации интеллектуальной собственности (РНИИИС) профессор В. Н. Лопатин приводит сравнение одного из направлений РТП и показывает существенное отставание региональной инновационной структуры по результатам интеллектуальной продукции от соответствующих результатов. Более того, автор показывает сокращение научных и научно-исследовательских организаций в крае на фоне их роста в Сибирском федеральном округе, где в большинстве регионов (кроме Новосибирска и Томска) условия для их развития можно оценивать более низкими, чем в крае [13] (табл. 5).

Таблица 4

Основные направления европейских, российских и красноярских региональных платформ

Приоритетные области	ТП в ЕС – 36	ТП РФ – 31	РТП региона – 11
Медицинские и биотехнологии	2	3	1
Информационно-коммуникационные технологии	2	2	2
Фотоника	1	2	–
Авиакосмические технологии	3	3	2
Ядерно-радиационные технологии	1	3	–
Энергетика	6	3	2
Технологии транспорта	3	2	–
Технологии металлургии и новых материалов	2	2	2
Добыча полезных ресурсов и нефтегазопереработка	1	3	2
Электронное машиностроение	4	4	1
Промышленные технологии строительства	3	1	1
Сельское хозяйство, пищевая промышленность	1	1	1
Лесное хозяйство и лесопереработка		–	
Экологическое развитие	2	1	

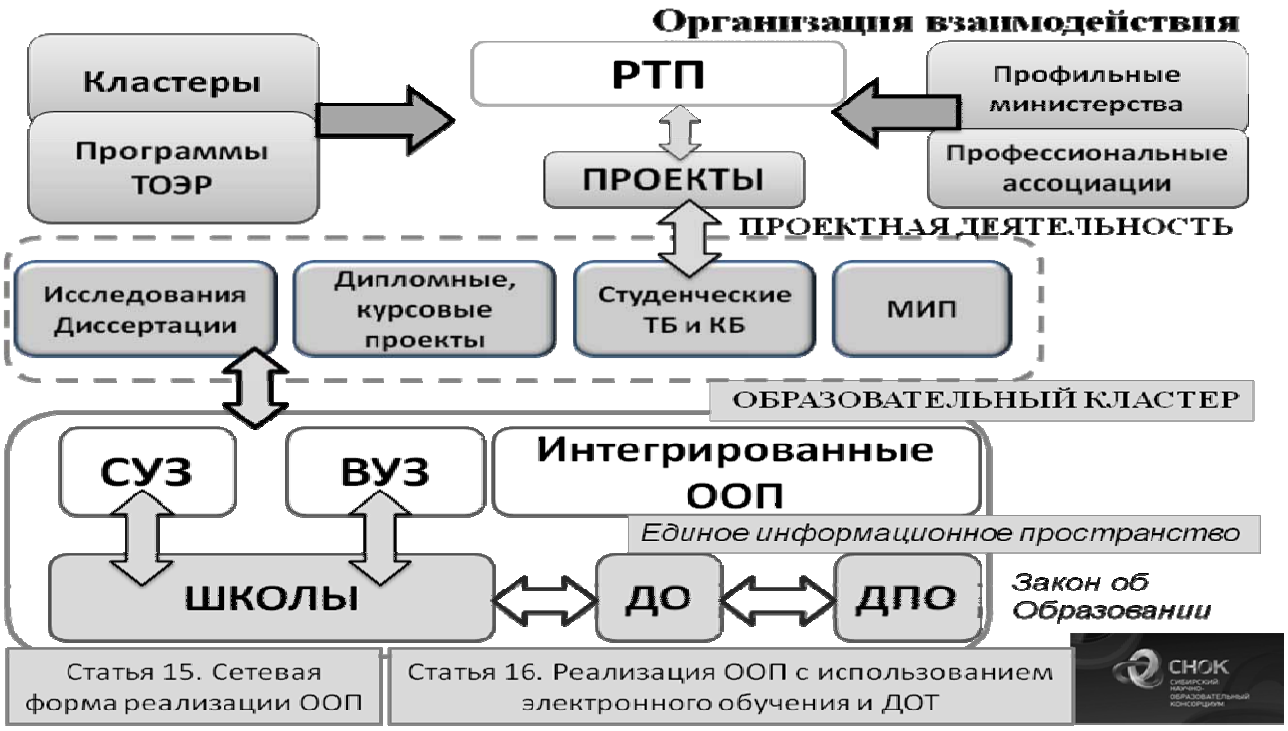


Рис. 2. Взаимодействие субъектов РТП в научно-исследовательском, технологическом и образовательном пространстве

Таблица 5

Рынок интеллектуальной собственности в региональной инновационной системе

№ п/п	Показатели	Новосибирская область (2014 г.)	Красноярский край (2013 г.)
1	Общие расходы на НИОКР, млн руб.	19300 (17 %)	11700 /31000
2	Кол-во организаций в проведении НИОКР/ кол-во исследователей	430/21368	53/6300
3	Научный потенциал	1632 д-ра наук, 3780 канд. наук, 3216 асп., 117000 студ.	554 д-ра наук, 2046 канд. наук, 1990 асп., 62611 студ.
4	Результаты интеллектуальной деятельности	970 патентов, 6397 НП, 86 ПЭВМ, 7 БД, 28 ноу-хау	624 патента, 4712 НП, 298 ПЭВМ, 18 БД, 12 ноу-хау
5	Нематериальные активы	344 млн руб. в том числе казна – 0,4 млн руб. (105 объектов)	3,5 млн руб. (576 объектов учета)

Важные выводы делает М. С. Липецкая, директор фонда ЦСР «Северо-Запад» в докладе «Подходы к проектированию региональной инновационной структуры Красноярского края» [14]. Она показывает, что в настоящее время практически все организации РИС малоактивны и не видят единых целей. Сторонниками изменений являются университеты, НИИ, институты публичного администрирования (власти). При дальнейшем развитии РИС активность в развитии инноваций перейдет к технологическому бизнесу, а современные инициаторы сохранят активное участие.

Исходя из приведенных анализов, всем участникам региональной инновационной структуры необходимы глубокие изменения как форм, так и содержания работы.

Новый вызов инновационной инфраструктуре региона. Работа на новом этапе по обеспечению инновационного развития экономики региона требует учета глубоких изменений, которые произошли в политическом и экономическом направлениях. В условиях принятых санкций против РФ и наших ответных мер значение коммерциализации и выпуска продукции на основе проектов РТП существенно возросло. По ряду направлений это стало важным фактором развития и сохранения стабильности. Так, в агропромышленном комплексе региона появились новые возможности для производства качественной продукции и выхода на рынки региона и страны. Существенно возросли ожидания сельхозпроизводителей по новым технологиям в животноводстве и полеводстве. Особое значение имеет скоординированная работа по формированию современных систем переработки и логистики. На этом фоне группой ученых прорабатываются возможности комплексного развития территорий края на основе кооперации и интеграции ресурсов и создания региональных оптово-логистических центров [15; 16].

Существенно изменились условия в каждой технологической платформе в условиях санкций,

и особенно в связи с поиском возможностей российской экономики по участию в реализации глобальных мегапроектов, инициированных как Китаем, так и содружеством стран в рамках БРИКС и ШОС. В мегапроекте «Новый шелковый путь» смогут участвовать до 60 стран из четырех континентов Земли с общим числом жителей, составляющих более половины населения планеты. Этот проект вносит существенные изменения и в сибирскую транспортную инфраструктуру. Продолжится развитие Транссибирской магистрали, ее второй ветки БАМ – Дальний Восток, развитие газопровода «Сила Сибири» позволит поставлять газ на территорию региона и других регионов Сибири. Развитие Северного морского пути и его приполярной трассы создает возможности развития ряда территорий края. На этом фоне РТП машиностроительного, энергетического, информационно-космического, металлургического и ряда других направлений имеют возможность включиться в реализацию крупнейших проектов по импортозамещению для нефтегазовых предприятий, предприятий цветной металлургии, добычи полезных ископаемых, глубокой переработки леса, поставки отдельных изделий на эти проекты, развития продовольственного направления «Зеленая продукция Сибири» и др.

Существенно возрастает роль научно-образовательной составляющей каждой РТП. Для новых производств требуются высококвалифицированные специалисты, которых следует готовить с прицелом на их участие в реализации мегапроектов. Это означает, что следует уделить внимание восточным языкам, изучению практик ведения бизнеса, планирования, инвестирования, согласованию стандартов этих стран с российскими и др. От согласованных усилий университетов и научно-образовательных организаций – участников РТП региона будет зависеть возможность приглашения обучения в регионе студентов, магистров и аспирантов из стран-участников мегапроектов по востребованным экономикой их стран направлениям. Желательно развитие межуниверситетских исследований, сетевых форм обучения и др.

Современные направления совершенствования деятельности РТП в условиях глобальных проектов должны сосредоточиться:

– на выборе целевых рынков на волне нового развития;

– формировании инновационной инфраструктуры интегрированной средой;

– ставке на активность предприятий-лидеров и их поддержку;

– формировании инновационных комплексов на основе кооперации и интеграции ресурсов – производства, переработки, реализации;

– открытости зарубежным партнерам и развитии внешних рынков сибирской продукции;

– глубокой маркетинговой работе на новых рынках;

– переоформлении на новые цели большинства проектов, реализуемых в РТП.

Первостепенное значение приобретает развитие новых региональных, межрегиональных и международных рынков как в пределах ЕАЭС, так и прежде всего на рынках стран пояса «нового шелкового пути» и др.

Для обеспечения кооперации, налаживания коммуникационных межотраслевых связей, для организации деятельности РТП, в том числе в новом формате сооучастия в мегапроектах Азия–Сибирь–Европа (АСЕ), существенным является функция координатора РТП. В роли интегратора и координатора деятельности РТП в регионе выступает ассоциация «Сибирский научно-образовательный консорциум» (СНОК).

Ключевыми стратегическими направлениями деятельности консорциума как составной части общей региональной инновационной структуры региона могут быть:

– участие консорциума в социально-экономических программах и проектах Красноярского края; в формате РТП обеспечение кооперации ресурсов на инновационных проектах региона и вхождение в глобальные проекты – транссибирский транспортный коридор, «новый шелковый путь», Севморпуть, взаимодействие по реализации проектов стран ШОС и БРИКС;

– организация коммуникационной площадки, обеспечивающей представительство заинтересованных сторон, между бизнесом, наукой, образовательными организациями и властью с целью содействия в выработке и актуализации мероприятий по развитию инновационной среды края, реализации проектов по организации кооперационных и интеграционных форм частно-государственного партнерства;

– организационное, коммуникационное и ресурсное обеспечение решения задач подготовки кадров для региональной инновационной системы края на основе межуровневой интеграции образовательных организаций, экспертное сопровождение вопросов интеграции общего, профессионального и высшего образования, развитие интернационализации системы образования региона;

– всесторонняя поддержка талантов на всех уровнях обучения и квалифицированных специалистов на основе включенности в бизнес-процессы, содействие формированию экономической активности, креативных сообществ и креативного класса в целом в регионе под инновационную экономику, оператор краевого проекта «Политехническая школа», развитие сети инженерных, специализированных классов.

Для эффективной реализации инновационной политики в регионе необходимо:

– наделение функциональными полномочиями профильных министерств края по поддержке и реализации инновационных проектов, в том числе проектов РТП, включению базовых проектов в отраслевые долгосрочные целевые программы, оказанию содействия (лоббированию) их вхождения в программы РФ;

– дополнить функциональные обязанности министров и руководителей агентств и их заместителей в части ответственности развития инновационной составляющей экономики по отраслям, реализации проектов в рамках технологических кластеров и РТП, сформировать показатели инновационного развития отраслей;

Таблица 6

Оценка готовности Красноярского края к получению поддержки инновационных проектов

№ п/п	Условия для получения поддержки	Наличие или отсутствие этих условий в регионе
1	Обеспечение создания и развития объектов инновационной инфраструктуры	КЗ № 6-2000, 2008 г., Стратегия «Инновационный Красноярск – 2020», 11 РТП
2	Развитие коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности	Слабое развитие. Коммерциализация отдельных проектов
3	Стимулирование производства инновационной продукции	Не определяются виды инновационной продукции, нет госзаказа
4	Реализация программ инновационного развития	Программы сосредоточены на формировании субъектов РИС, а не на продуктах
5	Популяризация инновационной деятельности	Слабое развитие. Только на днях науки края и фестивале «Школьная наука»
6	Реализация программ и проектов инновационного развития территорий	Железногорский кластер, субъекты РИС в Красноярске, МИЦы в территориях
7	Поддержка образовательных программ	Начало формирования промышленных и естественно-научных классов, профессий в СПО
8	Развитие системы финансирования инновационной деятельности	Субсидии субъектам РИС, гранты отдельным разработчикам. В отраслях отсутствует анализ инновационных продуктов
9	Поддержка внешнеэкономической деятельности	В связи с инновационными товарами и услугами поддержки нет

– внести соответствующие изменения в закон Красноярского края от 1 декабря 2011 года № 13-6629 «О научной, научно-технической и инновационной деятельности в Красноярском крае» (Ведомости высших органов государственной власти Красноярского края, 22 декабря 2011 года, № 68 (509)), определив функциональные обязанности министерств и ведомств, дополнить перечень субъектов инновационного развития новыми составляющими, в том числе региональными технологическими платформами, ассоциацией «СНОК», Железногорским инновационным кластером. Включить проекты РТП в целевые программы и программный бюджет края, определить возможности субсидирования реальных проектов (предложения по дополнению закона сформированы);

– создание условий для заказа в рамках государственных и муниципальных закупок инновационной продукции и услуг региональных производителей не менее 15 % от общих сумм закупок, что позволит стимулировать производство инновационных продуктов [15; 16].

В 2015 и последующие годы регионы, претендующие на федеральную поддержку пилотных инновационных кластеров, должны продемонстрировать комплексный подход к поддержке инноваций. Проанализируем готовность региона к такому развитию (табл. 6).

Заключение. Из проведенного анализа видно, что региональные технологические платформы как одна из форм кооперации ресурсов бизнеса, общества и власти для реализации инновационных задач региона формируют базу для сбалансированного развития, но требуют еще значительных усилий по формированию законодательной базы, соорганизации деятельности. По большинству параметров регион должен усилить свою работу и получить возможность активно сотрудничать с федеральными структурами по обеспечению своего инновационного развития и вхождению в глобальные проекты, что и должно ежедневно реализовываться всеми участниками инновационного процесса.

Библиографические ссылки

1. Шадрин А. И. Комплексное развитие региона / под науч. ред. И. А. Ильина ; Краснояр. гос. пед. ун-т им. В. П. Астафьева. Красноярск, 2011. 268 с.

2. Хилл Ф., Гэдди К. Сибирское бремя: Просчеты советского планирования и будущее России : пер. с англ. М. : Научно-образовательный форум по международным отношениям, 2007. 328 с.

3. Индикаторы инновационной деятельности : стат. сб. / Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». М., 2014. 472 с. Разд. 1.

4. Индикаторы инновационной деятельности : стат. сб. / Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». М., 2014. 472 с. Разд. 2.6.

5. Повестка развития инновационной инфраструктуры в Российской Федерации / А. Е. Шабрин [и др.] // Резюме отчета о деятельности проектного офиса ОАО «РИК» и Минэкономразвития России по развитию объектов инновационной инфраструктуры за период 08.2014–06.2015: ротапринт / Центр стратегического развития. СПб. 2015. 25 с.

6. Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 г. № 2227-р [Электронный ресурс]. URL. http://www.docs.cntd.ru› document/902317973.

7. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Центрального федерального округа до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 06.09.2011 № 1540-р [Электронный ресурс]. URL. http://www.docs.cntd.ru›document/902311321.

8. О государственной поддержке научной, научно-технической и инновационной деятельности на территории Красноярского края : закон Красноярского края от 10.07.2008 г. № 6-2000 [Электронный ресурс]. URL. http://www.docs.cntd.ru›document/985015773.

9. Об утверждении Стратегии инновационного развития Красноярского края на период до 2020 года «Инновационный край – 2020» : указ Губернатора

Красноярского края [Электронный ресурс]. URL. http://www.docs.cntd.ru>document/985024710.

10. Текущий архив ассоциации «СНОК» за 2014–2015 гг.

11. Об утверждении отраслевой программы «Развитие лесного комплекса Красноярского края на 2015–2017 годы» : распоряжение Правительства Красноярского края от 9 октября 2014 г. № 772-Р [Электронный ресурс]. URL. http://www.base.garant.ru/29905706/#ixzz3lgGcPxs0.

12. Об утверждении отраслевой программы «Развитие транспорта Красноярского края на 2015–2017 годы» : распоряжение Правительства Красноярского края от 09.10.2014 № 773-р [Электронный ресурс]. URL. http://www.base.garant.ru/29905706/#ixzz3lgGcPxs0.

13. Лопатин В. Н. Управление интеллектуальной собственностью в региональной инновационной системе Красноярского края : доклад РНИИИС [Электронный ресурс]. URL. http://www.rniiis.ru. Слайд 18.

14. Липецкая М. С. Подходы к проектированию региональной инновационной структуры Красноярского края : доклад ЦСР «Северо-Запад» // Текущий архив ассоциации «СНОК».

15. Куимов В. В. Региональные платформы и кластеры – профессионально-общественные структуры поддержки инновационного развития в Красноярском крае // Траектории реформирования российской экономики : материалы Междунар. эконом. симпозиума, посвященного 50-летию экономического факультета ТГУ. Томск, 2014. С. 301–305.

16. Куимов В. В., Щербенко Е. В. Продовольственный рынок Сибири: возможно ли экспортировать в страны Азиатско-Тихоокеанского региона? // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Гуманитарные науки». 2015. Т. 8, № Supplement. С. 166–179.

References

1. Shadrin A. I. *Kompleksnoe razvitie regiona* [Integrated development of the region] Krasnoiarsk, Krasnoiar. gos. ped. un-t im. V. P. Astaf'eva Publ., 2011, 268 p.

2. Fiona Hill, Clifford Gaddi. Sibirian Curse: How Communist Planers Left Russia Out in the Cold. 2007, 328 p.

3. [Indicators of innovative activity: 2014]. *Statisticheskii sbornik.* [Statistical Yearbook]. Moscow, Nazional'nyi issledovatel'skii universitet "Vysshaia shkola ekonomiki" Publ., 2014, P. 16.

4. [Indicators of innovative activity: 2014]. *Statisticheskii sbornik.* [Statistical Yearbook]. Moscow, Nazional'nyi issledovatel'skii universitet "Vysshaia shkola ekonomiki" Publ., 2014, P. 63.

5. Shabrin A. E., Kuznezov E. B., Kniaginin V. N., Gusev A. N. et al. [The agenda of innovation infrastructure development in the Russian Federation]. *Reziume otcheta o deiatel'nosti Proektnogo ofisa OAO "RIK" I Minekonomrazvitiia Rossii po razvitiiu ob"ektov innovatsionnoi infrastruktury za period 08.2014-06.2015.* [A summary of the activities of the Project Office of "RIC" and the Russian Ministry of Economic Development for the development of innovation infrastructure facilities during the period 08.2014-06.2015]. St.Peterburg, Tsentr strategicheskogo razvitiia Publ., 2015, 25 p.

6. Order of the RF Government of 08.12.2011 № 2227-r "On approval of the Strategy of innovative development of the Russian Federation until 2020" (In Russ.).

7. Order of the RF Government of 06.09.2011 № 1540-r "On approval of the Strategy of socio-economic development of the Central Federal District until 2020" (In Russ.).

8. Law of Krasnoyarsk Krai of 10.07.2008 № 6-2000 "On state support of scientific, technical and innovative activity in the Krasnoyarsk Territory" (In Russ.).

9. Decree of the Governor of the Krasnoyarsk Territory "On Approval of the" Strategy of innovative development of the Krasnoyarsk Territory for the period up to 2020 "Innovation Region – 2020" (In Russ.).

10. The current archive of the Association "Snok for 2014-2015 GG" (In Russ.).

11. Order of the Government of Krasnoyarsk Territory on October 9, 2014 N 772-P On approval of the sectoral program "Development of Forestry of the Krasnoyarsk Territory in the years 2015–2017" (In Russ.). Available at: http://base.garant.ru/29905706/#ixzz3lgGcPxs0.

12. Order of the Government of Krasnoyarsk Krai of 09.10.2014 N 773-p On approval of the sectoral program "Development of Transport Krasnoyarsk Territory for 2015–2017" (In Russ.). Available at: http://base.garant.ru/29905706/#ixzz3lgGcPxs0.

13. Lopatin V. N. *Doklal RNIIIS "Upravlenie intellektual'noi sobstvennost'iu v regional'noi innovatsionnoi sisteme Krasnoiarskogo kraia".* [Report NSRIIP "Management of intellectual property in the regional innovation system of the Krasnoyarsk Territory"] (In Russ.). Available at: http:// rniiis.ru.

14. Lipezkaia M. S. *Doklad TsSR "Severo-Zapad" "Podkhody k proektirovaniyu regional'noy innovatsionnoy struktury Krasnoyarskogo kraya".* [Report of the CSR "North-West" "Approach to the design of the regional innovation structure of the Krasnoyarsk Territory"]. The current archive of the Association "Snok". 2015, P. 152 (In Russ.).

15. Kuimov V. V. [Regional platforms and clusters, public-professional structure of support of innovative development in the Krasnoyarsk Territory]. *Materialu Mezhdunarodnogo ekonomicheskogo simpoziuma, posviashchennogo 50-letiiu ekonomicheskogo fakul'teta TGU "Traektorii reformirovaniia rossiiskoi ekonomiki"* [Proceedings of the International economic symposium "Trajectories of reforming the Russian economy"]. Tomsk, 2014, P. 301–305 (In Russ.).

16. Kuimov V. V, Shcherbenko E. V. [The food market of Siberia: Is it possible to export to the Asia-Pacific region]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriia: Gumanitarnue nauki.* 2015, Vol. 8, P. 166–179 (In Russ.).

© Куимов В. В., Куимов А. О., Толстой Д. А., 2015

УДК 338.49

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1038–1043

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗМА ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ)

А. А. Лукьянова*, Е. С. Кононова, Ю. А. Лютых

Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева
Российская Федерация, 660049, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89
*E-mail: aaluk110@mail.ru

Рассматриваются пути формирования и повышения эффективности механизма регулирования развития региональных социально-экономических систем, позволяющие достичь основных целей государственного регулирования социально-экономического развития, на примере Красноярского края.

Предметом исследования, результаты которого отражены в настоящей статье, являются управленческие отношения, возникающие в процессе регулирования социально-экономического развития региона.

Целью данной статьи является выработка рекомендаций по формированию механизма государственного регулирования социально-экономического развития, адаптированного к нуждам конкретной территории – Красноярского края, региона, обладающего выраженными признаками сырьевой специализации, а также предложение путей повышения эффективности механизма государственного регулирования регионального социально-экономического развития.

Теоретической и методологической основой исследования, результаты которого отражены в статье, послужили фундаментальные труды зарубежных и отечественных авторов в области теории и практики государственного регулирования социально-экономического развития регионов.

Исследование показало, что на сегодняшний день в Красноярском крае наблюдаются значительные проблемы, препятствующие устойчивому социально-экономическому развитию региона, в частности, недостаточное развитие высокотехнологичных отраслей промышленности (за исключением аэрокосмической отрасли, опыт развития которой может успешно использоваться при формировании стратегий развития прочих отраслей), а также недостаточная инновационная активность. Выявленные проблемы требуют вмешательства государства и не могут быть решены только рыночными методами. Таким образом, формирование и реализация эффективного механизма государственного регулирования является одной из приоритетных задач государственной власти Красноярского края.

В результате исследования, результаты которого отражены в статье, выработаны рекомендации по формированию механизма государственного регулирования социально-экономического развития Красноярского края, учитывающие специфические проблемы региона, выявленные в ходе проведенного авторами анализа, предложены пути повышения эффективности механизма с помощью внедрения программно-целевого подхода. Результаты исследования послужат основой для формирования эффективного механизма государственного регулирования социально-экономического развития Красноярского края и могут использоваться при формировании механизмов государственного регулирования социально-экономического развития других регионов сырьевой направленности.

Ключевые слова: государственное регулирование, социально-экономическое развитие, регион, механизм регулирования, программно-целевой подход.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1038–1043

WAYS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF THE MECHANISM OF STATE REGULATION OF SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF REGION (ON THE EXAMPLE OF KRASNOYARSK REGION)

A. A. Lukyanova*, E. S. Kononova, Y. A. Lyutykh

Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev
89, Ada Lebedevs St., Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation
*E-mail: aaluk110@mail.ru

The article discusses the ways of forming and improving the efficiency of the mechanism of regulation of the regional socio-economic systems, which allows to achieve the main objectives of state regulation of socio-economic development, on the example of Krasnoyarsk region.

The subject of the study, the results of which are reflected in this material are management relations arising in the process of regulation of socio-economic development of the region.

The purpose of this article is to make recommendations on formation of the mechanism of state regulation of socio-economic development, adapted to the needs of a particular territory, the Krasnoyarsk territory, the region with pronounced signs of commodity specialization, as well as offer ways to improve the efficiency of the mechanism of state regulation of regional socio-economic development.

Theoretical and methodological basis of the research, the results of which are reflected in the article, was the fundamental works of foreign and domestic authors in the field of the theory and practice of state regulation of socio-economic development of regions.

The study showed that today in Krasnoyarsk region there are significant challenges to sustainable socio-economic development of the region, in particular, a lack of development of high-tech industries (except aerospace, development experience which can be successfully used in the formation of strategies for the development of other industries), as well as insufficient innovative activity. Identified problems require the intervention of the state and cannot be solved only by market methods. Thus, the formation and implementation of an effective mechanism of state regulation is one of the priority tasks of the state authorities of the Krasnoyarsk territory.

In the result of the study, the results of which are reflected in the article, recommendations on formation of the mechanism of state regulation of socio-economic development of Krasnoyarsk region, taking into account the specific problems of the region, revealed by the authors of the analysis, propose ways to improve the efficiency of the mechanism through the introduction of program-target approach. The results of the study will serve as a basis for the formation of an effective mechanism of state regulation of socio-economic development of the Krasnoyarsk region and can be used in the formation of mechanisms of state regulation of socio-economic development of other regions of the material orientation.

Keywords: state regulation, socio-economic development, region, mechanism of regulation, result-oriented approach.

Введение. Проблемы социально-экономического развития регионов являются на сегодняшний день одной из наиболее актуальных тем научных исследований. Поиск решений, позволяющих добиться положительных результатов при переходе региона к устойчивому социально-экономическому развитию, становится одной из ключевых задач как научного сообщества, так и региональных администраций.

Интерес научного сообщества к вопросам государственного регулирования регионального социально-экономического развития достаточно высок. Проблемы государственного регулирования и управления в своих исследованиях широко освещают как зарубежные [1, с. 83], так и отечественные ученые [2–6].

Ключевым элементом системы государственного регулирования социально-экономического развития является механизм регулирования, представляющий собой систему элементов, позволяющих направлять социально-экономическое развитие региона в соответствии с целями регулирования. Выработка эффективного механизма государственного регулирования социально-экономического развития, позволяющего сочетать устойчивое экономическое развитие и рыночные механизмы функционирования экономики, является на сегодняшний день первостепенной задачей государственного регулирования развития региональных социально-экономических систем.

Цели механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона. Как показал анализ мирового опыта государственного регулирования региональных социально-экономических систем, цели механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона основываются на диагностике проблем, наиболее остро стоящих перед конкретным регионом и препятствующих реализации на его территории стратегии устойчивого социально-экономического развития.

В рамках настоящего исследования нами был проведен анализ социально-экономического положения одного из крупнейших регионов нашей страны – Красноярского края. Анализ проводился с использованием метода SWOT-анализа, анализа основных социально-экономических показателей, а также анализа на основании разработанной нами системы индикаторов устойчивого социально-экономического развития. В ходе анализа было выявлено, что наиболее острыми проблемами в социально-экономическом развитии Красноярского края, требующими решения при помощи эффективного механизма государственного регулирования социально-экономического развития, являются следующие:

– высокий уровень специализации промышленности в сфере природопользования;

– высокая степень монополизации промышленного комплекса;

– низкий уровень развития промышленности в сфере глубокой переработки и высокотехнологичных производств;

– спад производства в сельскохозяйственной отрасли;

– недостаточный уровень развития региональной финансово-кредитной системы;

– недостаточный уровень инновационной активности;

– неблагоприятная экологическая обстановка;

– высокий уровень дифференциации доходов;

– отток высококвалифицированных кадров ввиду низких темпов развития высокотехнологичных производств, недостаточный уровень образования занятых в экономике региона;

– высокая доля убыточных предприятий и организаций в общем количестве предприятий и организаций региона;

– недостаточный уровень развития транспортной инфраструктуры [7, с. 153–157].

По нашему мнению, на основании вышеизложенного, к ключевым целям механизма государственного регулирования социального-экономического развития региона можно отнести следующие:

– формирование диверсифицированной структуры промышленного производства на территории региона;

– создание так называемых полюсов роста на территории региона, включающих промышленные кластеры и зоны эффективного предпринимательства;

– повышение конкурентоспособности продукции региональных производителей;

– формирование эффективной системы поддержки региональных производителей сельскохозяйственной продукции;

– усиление интеграции промышленного и финансово-кредитного секторов региона;

– формирование эффективной системы поддержки малого и среднего бизнеса на территории региона;

– улучшение экологической обстановки;

– рост занятости и доходов населения региона;

– формирование системы взаимодействия образовательных организаций региона и организаций-работодателей, позволяющей осуществлять подготовку высококвалифицированных кадров, востребованных в регионе;

– создание условий для повышения эффективности деятельности организаций и предприятий региона, работающих в низкомаржинальных сферах;

– формирование системы финансирования инфраструктурных проектов на условиях частно-государственного партнерства.

Порядок разработки механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона. На основании результатов оценки текущего состояния региона и выявления проблем, наиболее остро стоящих перед региональной властью, необходимо спланировать непосредственно механизм государственного регулирования социально-экономического развития региона. Нам представляется, что основными этапами разработки такого механизма являются:

– планирование целевых показателей состояния региона, которых необходимо достичь посредством применения системы мер; планирование сроков достижения показателей; определение задач, требующих решения в рамках достижения целевых показателей;

– формирование системы мер государственного регулирования социально-экономического развития региона, позволяющих решить поставленные задачи и достичь целевых показателей уровня развития региона;

– формирование системы оценочных параметров, показателей, методов оценки, позволяющих определить уровень достижения целевых показателей и эффективность применяемого механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона;

– установление сроков и периодичности оценки.

Предложенный порядок позволяет, во-первых, осуществить выработку механизма государственного регулирования, отвечающего потребностям конкретного региона, и, во-вторых, осуществлять своевременную оценку его эффективности в целях оперативной корректировки.

Элементы механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона. В соответствии с целями, указанными нами в качестве ключевых при выработке механизма государственного регулирования социально-экономического развития Красноярского края, в качестве конкретных мер регулирования мы предлагаем следующие:

– стимулирование развития на территории региона производств продукции высоких переделов, а также высокотехнологичной и инновационной продукции при помощи проектного финансирования, включение данных типов производств в региональные и федеральные целевые программы;

– участие в финансировании создания на территории региона промышленных кластеров, особых экономических зон и т. д.;

– формирование системы частного инвестирования в отрасли промышленности, не связанные с освоением природных ресурсов региона, путем предоставления вновь создаваемым или модернизируемым предприятиям налоговых льгот, поручительств государства при получении указанными предприятиями кредитов в коммерческих банках и пр.;

– создание условий для развития региональной финансово-кредитной системы, выраженное в предоставлении региональным банкам преференций при рассмотрении их в качестве партнеров малых и средних инвестиционных проектов, реализуемых администрацией региона, передача права расчетно-кассового обслуживания организаций, открываемых при государственной поддержке региональных властей, региональным банкам;

– направление повышенных доходов, получаемых за счет эксплуатации природных ресурсов региона, в части, поступающей в региональный бюджет, на развитие инфраструктурных проектов и стимулирование научных исследований в области инноваций.

Система целевых показателей и система индикаторов, применяемых при мониторинге эффективности реализуемого на территории региона механизма государственного регулирования социально-экономического развития, также должны учитывать специфические черты конкретного региона и удовлетворять следующим требованиям:

– соответствовать целям, установленным региональными и общегосударственными программами развития;

– позволять осуществлять оперативную оценку и анализ темпов реализации механизма государственного регулирования регионального развития;

– включать в расчеты доступные, измеримые и достоверные данные;

– быть чувствительной к изменениям в различных процессах, происходящих в регионе и государстве в целом;

– иметь ограниченное количество индикаторов.

Использование на постоянной основе системы индикаторов уровня развития региона, разработанной для конкретной территории, позволит оперативно корректировать используемые меры государственного управления и механизм управления в целом, а также оценивать, в какой степени регион приблизился к намеченным целям.

Таким образом, выработка элементов механизма государственного регулирования, соответствующих специфике и проблемам региона, позволяет сформировать механизм государственного регулирования социально-экономического развития.

Пути повышения эффективности механизма государственного регулирования региональной социально-экономической системы. Как показывает опыт, основой эффективного механизма государственного регулирования региональной социально-экономической системы является перечень конкретных мероприятий, формирующих социально-экономические процессы путем объединения частных и государственных ресурсов и направления их на достижение целей механизма.

В целях повышения эффективности механизма государственного регулирования социально-экономического развития региона необходимо включать в его состав именно те мероприятия, которые соответствуют выявленным на этапе анализа проблемам региона.

Анализ международного и отечественного опыта реализации различных механизмов государственного регулирования социально-экономического развития регионов показал [8–13], что одним из наиболее эффективных методов, применяемых в регионах, сталкивающихся с проблемами социально-экономического развития, выявленными нами в Красноярском крае, является программно-целевой подход.

Разработка и реализация целевых программ является на сегодняшний день достаточно распространенным инструментом государственного управления. Следует отметить, что данный метод не является новым, и на сегодняшний день накоплен достаточно обширный опыт применения различных целевых программ как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Особенностью региональных целевых программ является то, что они учитывают специфические особенности конкретного региона, на развитие которого они направлены, а также нацелены на решение проблем, актуальных для данного региона.

Эффективная региональная целевая программа строится на ряде основополагающих принципов, без учета которых невозможно достижение целей реализации программы. К таким принципам, по нашему мнению, следует отнести:

– взаимоувязанность всех элементов программы;

– учет влияния мероприятий программы на все сферы общественной жизни, исключение негативного влияния экстерналий;

– наличие альтернативных вариантов реализации программы;

– определенность источников и объемов финансирования;

– четкое распределение функционала между исполнителями и руководителями реализации программы;

– измеримость, доступность и достоверность данных для осуществления контроля реализации программы;

– возможность оперативной корректировки программы по результатам контроля [14, с. 237].

Нам представляется, что существенно повысить эффективность формируемого на территории Красноярского края механизма государственного регулирования социально-экономического развития возможно с помощью реализации на территории региона следующих целевых программ:

1) диверсификации промышленного сектора региона;

2) стимулирования сельскохозяйственного сектора региона;

3) развития региональной финансово-кредитной системы;

4) экологической программы;

5) программы развития научно-образовательного сектора региона;

6) формирования благоприятного социального климата в регионе;

7) развития транспортной инфраструктуры.

Предложенный нами перечень программ и мер, безусловно, не является исчерпывающим. В ходе реализации той или иной программы будет происходить ее дробление на ряд более мелких подпрограмм, дополнение новыми программами, расширение перечня мер, включенных в программу. Кроме того, при детальной разработке каждой из программ, направленных на решение ключевых для региона проблем социально-экономического развития, необходимо определить источники финансирования мероприятий. Помимо бюджетного финансирования необходимо расширять участие коммерческого сектора региона в реализации программ, направленных на формирование вектора устойчивого социально-экономического развития Красноярского края, создавать условия, в которых отказ коммерческих предприятий от участия в таких программах будет невыгоден как с точки зрения текущего финансового результата, так и с точки зрения перспектив развития бизнеса на территории региона. Помимо перечисленных источников финансирования при реализации целевых программ, направленных на переход региона к устойчивому развитию, не следует пренебрегать и различными видами государственных заимствований.

Заключение. Проведенное нами исследование показало, что на сегодняшний день социально-экономическое развитие регионов нуждается в эффективном государственном регулировании. Механизм государственного регулирования регионального социально-экономического развития должен основываться на специфических проблемах территории и обладать направленностью, позволяющей решить эти проблемы в наиболее сжатые сроки и с наименьшими затратами.

Элементом механизма государственного регулирования регионального социально-экономического развития, зарекомендовавшим себя как один из наиболее эффективных в России и за рубежом, является программно-целевой подход. Разработка региональных целевых программ, ориентированных на решение конкретных проблем региона, позволяет оказывать концентрированное влияние на формирование благоприятных социально-экономических условий на территории региона.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что региональные власти не обладают достаточными полномочиями и финансовыми ресурсами для обеспечения прямого инвестирования в реализацию той или иной целевой программы [15, с. 213]. В связи с этим основной задачей администрации региона в данном случае становится, во-первых, создание привлекательных условий для формирования системы инвестирования со стороны частного капитала, а именно, различные меры фискального характера, нефинансовое стимулирование (консультационная поддержка, информационная поддержка, содействие в получении заемных средств путем предоставления государственных гарантий и т. д.), предоставление льгот и субсидий предприятиям малого и среднего бизнеса, осуществляющим деятельность в сферах, обозначенных в качестве ключевых для устойчивого социально-экономического развития региона, и, во-вторых, активное участие в различных федеральных целевых программах, позволяющих получить финансирование, источников которого нет в региональном бюджете.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что формирование и реализация эффективного механизма государственного регулирования регионального социально-экономического развития является приоритетной задачей всех уровней власти и позволит региону с выраженной сырьевой специализацией экономики изменить вектор социально-экономического развития и создать условия для устойчивого развития.

Библиографические ссылки

1. Porter M. E. The Competitive Advantage of Nations. London : Macmillan, 1990. 387 с.
2. Шинкевич А. И. Инновационное развитие промышленного комплекса: системообразующие элементы межсекториальных инноваций // Вестник Казан. технол. ун-та. 2009. № 5. С. 218–221.
3. Ускова Т. В. Управление устойчивым развитием региона : монография. Вологда : ИСЭРТ РАН, 2009. 355 с.
4. Мониторинг и оценка эколого-социоэкономического развития территории : монография / М. В. Россинская [и др.] ; под общ. ред. проф. М. В. Россинской. Шахты : ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2012. 174 с.
5. Лексин В. Н., Швецов А. Н. Государство и регионы: Теория и практика государственного регулирования территориального развития. 6-е изд., стереотип. М. : ЛИБРОКОМ, 2012. 368 с.
6. Гранберг А. Г., Данилов-Данильян В. И., Циканов М. М. Стратегия и проблемы устойчивого развития России в XXI веке. М. : Экономика, 2011. 310 с.
7. Kononova E. S. Problems of sustainable development of the regions and their solution methods (for example, the Krasnoyarsk territory) // 1st Intern. Conf. on Economic Sciences / «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna, Austria, 2014. С. 152–165.
8. Bucci A., Serge G. Human and cultural capital complementarities and externalities in economic growth // Working Papers DEAS. 2009. 07 February. P. 175–198.
9. Казакова Т. Л. Разработка системы индикаторов устойчивого развития для центрального Черноземья // Региональные исследования. 2008. № 1 (16). С. 20–23.
10. Кузнецов Ю. В. Методы государственного регулирования экономики // Проблемы взаимодействия хозяйствующих субъектов реального сектора экономики России: финансово-экономический, социально-политический, правовой и гуманитарный аспекты : сб. науч. ст. [Электронный ресурс]. СПб. : Ин-т бизнеса и права, 2011. URL. http://www.ibl.ru/konf/151211/ metody-gosudarstvennogo-regulirovanija.html.
11. Морозов И. А. Экономические показатели устойчивого развития и оценка ситуации в северо-западных регионах России // Пробл. соврем. экономики. 2007. № 4 (24). С. 266–270.
12. Экономические стратегии активных городов / под ред. Б. М. Гринчеля, К. Шуссмана, Н. Е. Костылевой. СПб. : Наука, 2002. 499 с.
13. Лукьянова А. А., Смородинова Н. И. Проблемы промышленного развития региона сырьевой направленности // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 181–183.
14. Кононова Е. С. Программно-целевой подход как часть методологии государственного регулирования устойчивого регионального развития // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. 2014. № 1. С. 235–238.
15. Маннапов Р. Г., Ахтариева Л. Г. Организационно-экономический механизм управления регионом: формирование, функционирование, развитие : монография. М. : КноРус, 2008. 352 с.

References

1. Porter M. E. The Competitive Advantage of Nations. London, Macmillan, 1990, 387 p.
2. Shinkevich A. I. [Innovative development of the industrial complex: system-forming elements of inter sectorial innovation]. *Vestnik Kazan. tekhnol. un-ta,* 2009, Vol. 5, P. 218–221 (In Russ.).
3. Uskova T. V. *Upravlenie ustoichivym razvitiem regiona* [Management of sustainable development of the region]. Vologda, ISERT RAN Publ., 2009, 355 p.
4. Rossinskaya M. V. *Monitoring i otsenka ekologo-sotsio-ekonomicheskogo razvitiya territorii: monografiya* [Monitoring and evaluation of environmental and socio-economic development: monograph]. Shakhty, YuRGUES Publ., 2012, 174 p.

5. Leksin V. N., Shvetsov A. N. *Gosudarstvo i regiony: Teoriya i praktika gosudarstvennogo regulirovaniya territorial'nogo razvitiya.* [The state and regions: Theory and practice of state regulation of territorial development]. Moscow, Librokom Publ., 2012, 368 p.

6. Granberg A. G., Danilov-Danil'yan V. I., Tsikanov M. M. *Strategiya i problemy ustoichivogo razvitiya Rossii v XXI veke* [Strategy and problems of sustainable development of Russia in XXI century]. Moscow, Ekonomika Publ., 2011, 310 p.

7. Kononova E. S. Problems of sustainable development of the regions and their solution methods (for example, the Krasnoyarsk territory). *1st International Conference on Economic Sciences: "East West" Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH,* Vienna, Austria, 2014, 152–165 p.

8. Bucci A. Human and cultural capital complementarities and externalities in economic growth. Working Papers DEAS, 2009, 07 February, p. 175–198.

9. Kazakova T. L. [Development of a system of indicators of sustainable development for the Central Chernozem region]. *Regional'nye issledovaniya,* 2008, Vol. 1 (16), P. 20–23 (In Russ.).

10. Kuznetsov Yu. V. [Methods of state regulation of economy]. *Problemy vzaimodeistviya khozyaistvuyushchikh sub"ektov real'nogo sektora ekonomiki Rossii: finansovo-ekonomicheskii sotsial'no-politicheskii, pravovoi i gumanitarnyi aspekty*. [Problems of interaction between economic entities of the real sector of the Russian economy: the financial and economic socio-political, legal and humanitarian aspects]. SPb, Institut biznesa i prava Publ., 2011 (In Russ.). Available at: http://www.ibl.ru/konf/151211/metody-gosudarstvennogo-regulirovanija.html.

11. Morozov I. A. [Economic indicators of sustainable development and assessment of the situation in the North-Western regions of Russia]. *Probl. sovrem. ekonomiki*. 2007, Vol. 4 (24), P. 266–270 (In Russ.).

12. *Ekonomicheskie strategii aktivnykh gorodov* [Economic strategy of active cities]. Ed. B. M. Grinchel, K. Shussman, N. E. Kostylev. St. Petersburg, Nauka Publ., 2002, 499 p.

13. Lukyanova A. A., Smorodinova N. I. [Problems of industrial development in the region of the material orientation]. *Vestnik SibGAU.*. 2012, No. 2 (42), P. 181–183 (In Russ.).

14. Kononova E. S. [Result-oriented approach as part of the methodology of state regulation of sustainable regional development]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V. P. Astaf'eva*, 2014, No. 1, P. 235–238 (In Russ.).

15. Mannapov R. G. *Organizatsionno-ekonomicheskii mekhanizm upravleniya regionom: formirovanie, funktsionirovanie, razvitie: monografiya* [Organizational-economic mechanism of management of the region: formation, functioning, development: monograph]. Moscow, Knorus Publ., 2008, 352 p.

© Лукьянова А. А., Кононова Е. С., Лютых Ю. А., 2015

УДК 330.131.7

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1044–1048

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД И МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

П. О. Михин, А. Н. Антамошкин, Е. А. Антамошкина*

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

Инновационное развитие в Российской Федерации сопряжено с высоким уровнем рисков, в том числе в космической промышленности. Значительное количество мировых рейтингов, в которых Россия занимает далеко не лидерские позиции, подтверждает этот факт. При работе с инновациями в космической отрасли необходимо учитывать риски, которые несет в себе каждый процесс в связи с быстрым ростом отрицательных последствий нарушений «нормального» функционирования экономических процессов. Организация работы по управлению рисками инновационной деятельности предприятий космической отрасли должна строиться с учетом необходимости решения следующих задач: формирование единой нормативной базы, возможность прогнозирования получаемых результатов, организация четких и своевременных коммуникаций, квалификация и обучение персонала предприятия. Для решения указанных задач предложен концептуальный подход управления рисками инновационной деятельности на предприятиях космической отрасли. Предлагаемый концептуальный подход сформирован на основании стоящих перед предприятием целей в области управления рисками инновационной деятельности. Реализация концептуального подхода подразумевает следование определенным в работе принципам. В рамках подхода предполагается осуществлять управление рисками через их идентификацию, формирование стратегии управления рисками, оптимизацию процессов с учетом сформированной стратегии управления инновационными рисками. Оптимизацию процессов следует проводить с использованием предлагаемой методики управления рисками инновационной деятельности предприятий космической отрасли. Методика включает анализ процессов, подверженных рискам инновационной деятельности, с применением тензорного метода анализа рисков.

Ключевые слова: риски инновационной деятельности, предприятия космической отрасли, концептуальный подход и методика управления рисками, тензорный метод Габриэля Крона.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1044–1048

CONCEPTIONAL APPROACH AND MANAGEMENT TECHNIQUE TO MANAGE RISKS OF INNOVATIONS IN THE SPACE INDUSTRY

P. O. Mikhin, A. N. Antamoshkin, E. A. Antamoshkina*

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

Innovation growth in the Russian Federation is accompanied by the high level of risks. A significant number of the world rankings which do not suppose Russia to be a leader confirms this fact. It is necessary to take into account risks that each process includes dealing with innovations in the space industry due to the rapid growth of the negative consequences of violations in the "normal" functioning of economic processes. Building up the risk management of innovations in the space industry should be implemented based on the need to solve the following problems: to set up a unified regulatory framework, to have an ability to predict the results, to organize clear and timely communication, qualification and training of plant staff. To solve these problems there is a provided conceptual approach of risk management of innovations in the space industry. The conceptual approach is formed on the basis of the goals set by the company in the field of risk innovation management. Implementation of the conceptual approach involves adherence to certain principles at work. As a part of the approach it is supposed to manage risks through their identification, formation of risk management strategies, process optimization based on a strategy of innovation risk management. Optimization of the process should be carried out using the introduced method of innovation risk management in the space industry.

The technique includes an analysis of the processes that are vulnerable to innovation risks using tensor method of risk analysis.

Keywords: Innovative risks, space industry enterprises, Gabriel Kron tensor method, conceptional approach and management technique to manage risks.

Введение. Исторически инновационные отрасли могут быть охарактеризованы как отрасли с повышенным уровнем рисков в сравнении с остальными. Данный тезис применим и к космической промышленности. В Российской Федерации уровень рисков инновационной деятельности особенно высок, что подтверждается значительным количеством мировых рейтингов, в которых Россия занимает далеко не лидерские позиции [1].

В дополнение к вышесказанному, процессы современного машиностроения постоянно усложняются, при этом их сложность растет по экспоненте. Сложность существующих процессов в настоящее время достигла такого уровня в силу внешних и внутренних условий ведения бизнеса, что практически невозможно встретить процесс, замкнутый на одном подразделении или сотруднике.

Все процессы требуют постоянного активного взаимодействия множества подразделений и подсистем, что не всегда проходит идеально или таким образом, как предполагалось первоначально. Однако возникает взаимная ответственность за результат процесса между всеми его участниками [2].

Анализ процессов и их отклонений может применяться при бизнес-моделировании, реинжиниринге, функционально-стоимостном анализе, автоматизации технологических процессов [3; 4].

Необходимость учёта рисков в процессах инновационной деятельности космической отрасли, как наиболее инновационной в настоящее время, является важным условием функционирования предприятия в связи с быстрым ростом отрицательных последствий нарушений «нормального» функционирования экономических процессов. Например, реакция на повышение сложностей в сфере сбыта и снабжения, что привело к развитию таких направлений, как логистика и маркетинг [5]. Также риск необходимо учитывать в связи с увеличением необходимости и возможности вовлечения элементов, обладающих высокой степенью неопределённости, в процесс принятия управленческих решений [6].

Ввиду последних мировых тенденций необходимо рассматривать процессы не только с точки зрения бизнес-показателей, но и с точки зрения рисков, которые несет в себе процесс или какой-либо его этап [7; 8]. В этой связи возникает необходимость перехода от системы «бизнес-координат», в которой измеряется процесс, к системе «риск-координат», применяя которую, специалисту можно будет сделать соответствующие выводы о рискованности процесса или его этапа [9].

Концептуальный подход к управлению рисками инновационной деятельности. К числу основных проблем, которые необходимо учитывать при решении задач, стоящих перед предприятием космической отрасли при построении системы управления рисками инновационной деятельности предприятия, авторы относят следующие:

1. Отсутствие у специалистов предприятий космической отрасли единого понятийного аппарата в области риск-менеджмента, что приводит к трудностям в разработке, согласовании и утверждении различных материалов и документов между риск-менеджерами и специалистами других подразделений.
2. Проблема прогнозирования получаемых результатов. Постоянный режим контрольных мероприятий позволяет заблаговременно выявить потенциальные риски, оценить уровень их возможного негативного влияния на бизнес-регистратора, своевременно выработать меры по предотвращению реализации неблагоприятных событий либо обеспечить проведение действенных мер по снижению негативного влияния уже реализовавшихся рисков. Управляя инновационными рисками, предприятие космической отрасли впервые с ними сталкивается, в связи с чем не имеет достаточной информационной и статистической базы для реализации эффективного функционирования прогнозной функции системы управления рисками.
3. Сложность коммуникаций в сфере управления инновациями, что влечет за собой «отрыв от корней», т. е. от того научно-практического фундамента, на котором возник современный риск-менеджмент. Это приводит к тому, что специалисты предприятий космической отрасли периодически будут «открывать уже открытую Америку». Будут ли они узнавать, что это уже было ранее открыто, или нет, зависит от достигнутой квалификации и налаженной системы коммуникаций.
4. Проблема квалификации персонала в сфере управления рисками. Построение эффективной системы управления рисками инновационной деятельности в значительной степени зависит от наличия соответствующих условий по подбору профильных специалистов. К сожалению, в настоящее время в России отсутствует налаженная система подготовки и переподготовки специалистов в сфере управления рисками. В некоторых учебных заведениях, в частности АНХ при Правительстве РФ и др., предпринимались попытки по переобучению в рамках программ повышения квалификации. Но этого недостаточно: нужна цельная программа профессиональной подготовки «Риск-менеджмент на предприятии», которая позволила бы осуществить целевую подготовку риск-менеджеров, отвечающих современным требованиям рыночной экономики. В определенной степени решение кадровой проблемы видится и в пересмотре вузами своих учебных планов обучения экономическим специальностям с введением как новых дисциплин (таких как «Финансовая инженерия», «Управление финансовыми и предпринимательскими рисками», «Принятие финансовых решений в условиях риска и неопределенности» и т. д.), так и с выделением

в рамках существующих дисциплин специальных подразделов (например, таких как «Анализ финансовых рисков» в дисциплине «Финансовый анализ» и т. п.).

Постановка проблем в данном аспекте определяет цели предприятия космической отрасли, состоящие в обеспечении системы управления рисками инновационной деятельности ресурсами и полномочиями, которые позволят:

– сформировать единую нормативную базу предприятия космической отрасли в сфере управления рисками инновационной деятельности;

– разработать и внедрить инструменты качественного и эффективного прогнозирования получаемых результатов, а также сбора данных о процессах реализации инноваций;

– обеспечить качественную и эффективную вертикальную, горизонтальную и диагональную коммуникацию в сфере управления рисками инноваций как внутри предприятия космической отрасли, так и среди предприятий отрасли с государственными органами, заинтересованными лицами;

– развивать институциональную среду и систему интеллектуального капитала таким образом, чтобы создать наилучшие институциональные и организационные условия внутри предприятия космической отрасли (по сравнению с конкурентами).

Для достижения комплекса поставленных целей необходима разработка методологии формирования, использования, развития и управления рисками инновационной деятельности предприятия космической отрасли [10]. Данная методология должна быть направлена на минимизацию ущерба от реализации инновационных рисков, что, в свою очередь, приводит к формированию механизма максимально стабильного инновационного развития бизнеса [11].

Для развития системы управления рисками инновационной деятельности предприятия космической отрасли автором предложен и сформулирован концептуальный подход, сущность которого заключается в следующем:

1. Определение существенных видов рисков для предприятия космической отрасли по каждому направлению деятельности. В целях исследования под существенными рисками понимаются такие риски, негативные последствия от реализации которых оказывают существенное влияние на финансовый результат и/или капитал, и/или ликвидность, и/или репутацию предприятия.

2. Разработка стратегии предприятия космической отрасли в управлении рисками инновационной деятельности, устанавливающей основные цели и задачи, стоящие перед системой управления рисками инновационной деятельности.

3. Оптимизация и совершенствование процессов предприятия космической отрасли с учетом целей и задач, установленных стратегией.

Управление рисками инноваций является сложным многофакторным явлением, для которого важны основные элементы, обеспечивающие эффективность управления:

– структурное подразделение, обеспечивающее управление существенным видом риска;

– коллегиальный орган, осуществляющий управление существенным видом риска;

– инструменты, такие как модели, программное обеспечение и т. п., обусловливающие возможность управления существенным видом риска;

– регламенты, методики, технологические схемы и иные внутренние нормативные документы компании, определяющие порядок функционирования системы управления существенным видом риска.

В целом можно сформулировать следующие положения, которые должны быть обязательно включены в нормативную базу предприятия:

– цели и задачи управления рисками предприятия;

– организационная структура управления рисками и принципы принятия решений по рискам;

– набор ключевых показателей рисков предприятия;

– культура управления риском и лимиты по ключевым рискам компании;

– набор способов покрытия рисков, используемых предприятием, и политика в отношении каждого способа;

– принципы отчетности и раскрытия информации по рискам.

Исходя из сути составляющей концептуального подхода, который является основным принятым направлением реализации системы управления рисками инновационной деятельности, подразумевается внедрение и соблюдение определенных принципов функционирования указанной системы управления рисками инновационной деятельности предприятия космической отрасли.

К числу таких принципов формирования системы управления рисками инновационной деятельности авторы относят следующие:

– принцип проактивности, который предусматривает, что система управления рисками инновационной деятельности направлена на реализацию не только известных рисков, но и на определение и исключение возможности реализации потенциальных рисков;

– принцип непрерывности деятельности системы управления рисками инновационной деятельности, который подразумевает функционирование такой системы на постоянной основе в рамках специально созданной организационной структуры на предприятии космической отрасли;

– принцип окупаемости, в рамках которого система управления рисками обеспечивает минимизацию рисков в размере большем, чем затрачено средств на эту минимизацию;

– принцип вовлеченности, согласно которому в процесс управления рисками инновационной деятельности должны быть включены все сотрудники предприятия в силу своих возможностей и в рамках своих полномочий и должностных обязанностей;

– принцип разделения ответственности, согласно которому ответственность за реализацию риска несет подразделение – владелец процесса.

Методика управления рисками инновационной деятельности. В соответствии с предложенным концептуальным подходом авторами предлагается к использованию методика управления рисками

инновационной деятельности предприятий космической отрасли. Методика включает в себя анализ процессов, подверженных рискам инновационной деятельности с применением тензорного метода анализа рисков [12–14]. Графическое описание методики представлено на рисунке.

Блок-схема методики управления рисками бизнес-процессов инновационной деятельности

Этапы методики:

1. Выбор процесса для анализа. Процесс определяется с учетом изложенного в концепции подхода к определению существенных видов риска. Целесообразно определять процесс, наиболее подверженный одному из существенных видов риска.

2. Построение карты процесса по нотации IDEF [15]. Формируется карта процесса с указанием последовательности и взаимосвязей между этапами процесса. В рамках этапа осуществляется также сбор статистических данных и замеры процесса по заранее определенным параметрам.

3. Преобразование процесса для применения тензорного метода. Карта процесса корректируется с учетом нормативных требований метода.

4. Применение тензорного метода для определения этапов процесса, наиболее подверженных риску.

5. Определение видов рисков, выявленных на проблемном этапе процесса.

6. Принятие решения по минимизации риска.

Заключение. Таким образом, построение системы управления рисками инновационной деятельности на предприятии космической отрасли должно быть реализовано в соответствии с предложенным концептуальным подходом, сформированным на основании стоящих перед предприятием целей в области управления рисками инновационной деятельности. Реализация концептуального подхода подразумевает следование определенным в работе принципам и в рамках применения тензорного метода анализа бизнес-процесса может быть внедрена на предприятии космической отрасли в составе предлагаемой методики управления рисками инновационной деятельности.

Библиографические ссылки

1. Грачева М. В., Ляпина С. Ю. Анализ и управление рисками инновационной деятельности : учеб. пособие. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 351 с.

2. Нальгиев А. К. С. Развитие процессного управления. М. : МАКС Пресс, 2004. 22 с.

3. Ойхман Е. Г., Попов Э. В. Реинжиниринг бизнеса: Реинжиниринг организаций и информационные технологии. М. : Финансы и статистика, 1997. 336 с.

4. Рапопорт Б. М., Скубченко А. И. Инжиниринг и моделирование бизнеса. М. : Тандем : Экмос, 2001. 240 с.

5. Балабанов И. Г. Риск-менеджмент. М. : Финансы и статистика, 1996. 196 с.

6. Рыжикова О. Н. Управление рисками инновационных проектов // Аудит и финансовый анализ. М. : ДСМ Пресс. 2009. № 1. С. 368–371.

7. Кочетов А. Г. Новационные бизнес-процессы. Пошаговая технология разработки, внедрения и контроля выполнения. М. : Эксмо, 2009. 144 с.

8. Теоретический анализ в научных экономических исследованиях: анализ основополагающих понятий : метод. пособие для аспирантов, магистров и студентов / Г. С. Михалев ; САА. Красноярск, 2000, 60 с.

9. Бартон Т., Шенкер У., Уокер П. Комплексный подход к риск-менеджменту: стоит ли этим заниматься : пер. с англ. М. : Вильямс, 2003. 208 с.

10. Чернова Г. В., Кудрявцев А. А. Управление рисками : учеб. пособие. М. : Велби : Проспект, 2005. 160 с.

11. Глущенко В. Риски инновационной и инвестиционной деятельности в условиях глобализации. Железнодорожный : ТОО НПЦ «Крылья», 2006. 232 с.

12. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. М. : Наука, 1972. 542 с.

13. Веревкина Е. В., Левин Д. Н., Петров М. Н. Тензорная методология исследования надежности бизнес-процессов : науч. изд. 2-е изд., доп. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2006. 135 с.

14. Веревкина Е. В., Левин Д. Н., Петров М. Н. Тензорная методология исследования надежности бизнес-процессов. Красноярск : НИИ СУВПТ, 2006. 135 с.

15. Структурный анализ систем. IDEF-технологии / С. В. Черемных [и др.]. М. : Финансы и статистика, 2001. 208 с.

References

1. Gracheva M. V. [et al.]. *Analiz i upravlenie riskami innovatsionnoi deyatel'nosti* [Risk analysis and management of innovation]. Moscow, YuNITI-DANA Publ., 2006, 351 p.

2. Nal'giev A. K. S. *Razvitie protsessnogo upravleniya*. [Process management development]. Moscow, MAKS Press Publ., 2004, 22 p.

3. Oikhman E. G., Popov E. V. *Reinzhiniring biznesa: Reinzhiniring organizatsii i informatsionnye tekhnologii.* [Reengineering Business: Reengineering organizations and information technology]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1997, 336 p.

4. Rapoport B. M., Skubchenko A. I. *Inzhiniring i modelirovanie biznesa*. [Engineering and Business Modeling]. Moscow, Tandem, Ekmos Publ., 2001, 240 p.

5. Balabanov I. G. *Risk-menedzhment*. [Risk Management]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1996, 196 p.

6. Ryzhikova O. N. [Risk Management of innovative projects]. *Audit i fin. analiz.* 2009, No. 1. 368–371 p. (In Russ.).

7. Kochetov A. G., *Novatsionnye biznes-protsessy. Poshagovaya tekhnologiya razrabotki, vnedreniya i kontrolya vypolneniya*. [Novation business processes. Turn-based technology development, implementation and monitoring of the implementation]. Moscow, Eksmo Publ., 2009, 144 p.

8. Mikhalev G. S. *Teoreticheskii analiz v nauchnykh ekonomicheskikh issledovaniyakh: analiz osnovopolagayushchikh ponyatii:* [Theoretical analysis of scientific economic research: the analysis of the fundamental concepts]. Krasnoyarsk, SAA Publ., 2000, 60 p.

9. Barton T., Shenker U., Uoker P. *Kompleksnyi podkhod k risk-menedzhmentu: stoit li etim zanimat'sya: Per. s angl*. [A comprehensive approach to risk management: is it worth doing it: Translated from English]. Moscow, Vil'yams Publ., 2003, 208 p.

10. Chernova G. V., Kudryavtsev A. A. *Upravlenie riskami* [Risk management]. Moscow, TK Velbi, Prospekt Publ., 2005, 160 p.

11. Glushchenko V. *Riski innovatsionnoi i investitsionnoi deyatel'nosti v usloviyakh globalizatsii*. [Risks of innovation and investment in the globalization context]. Zheleznodorozhnyi, Kryl'ya Publ., 2006, 232 p.

12. Kron G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika*. [Investigation of complex systems in parts – diacoptics]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 542 p.

13. Verevkina E. V., Levin D. N., Petrov M. N. *Tenzornaya metodologiya issledovaniya nadezhnosti biznes-protsessov* [Tensor research methodology of reliability of business processes]. Krasnoyarsk, NII SUVPT Publ., 2006. 135 p.

14. Verevkina E. V., Levin D. N., Petrov M. N. *Tenzornaya metodologiya issledovaniya nadezhnosti byuiznes-protsessov*. [Tensor research methodology reliability business processes]. Krasnoyarsk, NII SUVPT Publ., 2006, 135 p.

15. Cheremnykh S. V. et al. *Strukturnyi analiz sistem. IDEF-tekhnologii*. [Structural analysis systems. IDEF-technology]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2001, 208 p.

© Михин П. О., Антамошкин А. Н., Антамошкина Е. А., 2015

УДК 347.77

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1049–1059

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТАМОЖЕННОГО КОНТРОЛЯ ТОВАРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОБЪЕКТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

С. И. Сенашов, С. Н. Рудь

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

Описывается система таможенного контроля объектов интеллектуальной собственности в РФ и ее место в международной системе защиты объектов интеллектуальной собственности. Описана схема перемещения товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, через таможенную границу Таможенного союза. Указаны основные различия системы таможенного контроля объектов интеллектуальной собственности в РФ в сравнении с соглашением по торговым аспектам интеллектуальной собственности (ТРИПС). Использована статистика Федеральной таможенной службы РФ в части поступлений в федеральный бюджет РФ и составе данных поступлений. Предложены методические положения по усовершенствованию системы таможенного контроля товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности. В частности, было предложено расширение списка объектов интеллектуальной собственности, на которые распространяются полномочия Федеральной таможенной службы РФ, такие как патенты, и для этого следует внести поправки в нормативные акты, а также введение таможенных сборов за внесение объектов интеллектуальной собственности в таможенный реестр по аналогии со сборами Роспатента. Произведены предварительные расчеты для подтверждения этих положений. Предложены корректировки в схему таможенного контроля в части сроков действий должностных лиц таможенных органов в соответствии с процедурой ex-officio. Обновлена методика перемещения товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, через таможенную границу Таможенного союза.

Ключевые слова: интеллектуальная собственность, таможенные органы, таможенный контроль, ТРИПС, процедура ex-officio, таможенный сбор.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1049–1059

IMPROVEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY CUSTOMS CONTROL SYSTEM

S. I. Senashov, S. N. Rud

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: mrgreywolfdx@gmail.com

We described the system of customs control of intellectual property and its place in international system of intellectual property protection. The algorithm of transfer of goods containing intellectual property objects across the customs border of the Customs Union has been described. There are listed major differences of customs control of intellectual property in the Russian Federation in comparison with the Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights (TRIPS). The statistics of the Federal Customs Service of Russian Federation was used with regard to revenues to the federal budget of the Russian Federation and the composition of these revenues. We proposed some methodical regulations for the improvement of the system of customs control of goods containing intellectual property. Among these methodical regulations it was proposed to expand the list of intellectual property, which is subject to the authority of the Federal Customs Service of Russian Federation, such as patents, in connection with this there was proposed amendments to the regulations. Next suggested the introduction customs fees for the introduction of intellectual property rights in the customs register, an analogy with the charges of Rospatent was made and some calculations to validate the proposed formulas were done. We proposed some adjustments to the scheme of customs control of the terms of actions of customs officials in accordance with the ex-officio procedure. The algorithm of transfer of goods containing intellectual property objects across the customs border of the Customs Union has been updated. In conclusion we formulated of the final results of the problem study

Keywords: intellectual property, customs, customs control, TRIPS, ex-officio procedure, customs fee.

Введение. Проблема защиты интеллектуальной собственности (ИС) в нынешнее время имеет колоссальную актуальность и значимость. Достаточно остро стоит вопрос о необходимости усиления роли государства в защите ИС, которая, будучи включённой в экономический оборот, затрагивает общенациональные интересы во многих проявлениях. На данный момент одну из ключевых ролей в защите ИС играют таможенные органы. Это вызвано значительным увеличением объемов международной торговли контрафактной продукции. Основной деятельностью федеральной таможенной службы РФ в этой области является разработка изменений и дополнений в таможенное законодательство, а также создание нормативно-правовой базы в части регулирования вопросов защиты ИС таможенными органами.

Постоянное совершенствование нормативно-правовой базы говорит об актуальности и развитии данного направления.

Меры по защите ИС принимаются в отношении товаров, содержащих следующие объекты:

– объекты авторских прав;
– объекты смежных прав;
– товарные знаки;
– знаки обслуживания;
– наименования мест происхождения товара [1].

Все эти объекты, по заявлению правообладателя, включаются в таможенный реестр объектов ИС. Должностные лица таможенных органов вправе принимать меры по защите прав на объекты ИС по собственной инициативе. Данная процедура носит название ex-officio и утверждена соглашением по торговым аспектам интеллектуальной собственности (ТРИПС).

Правообладатель, имеющий достаточные основания полагать, что может иметь место нарушение его прав, в соответствии с законодательством РФ, в связи с ввозом или вывозом товаров из Российской Федерации либо при совершении иных действий с товарами, находящимися под таможенным контролем, вправе подать в Федеральную таможенную службу заявление о включении соответствующего объекта ИС в таможенный реестр объектов ИС. Действия, предусмотренные таможенным законодательством РФ и Таможенного союза, от имени правообладателя может осуществлять его представитель [1].

Рассмотренная выше система таможенного контроля товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, начала работать с 1 января 2004 года с вступлением в силу Таможенного кодекса РФ [2]. В 2010 году с вводом в действие Таможенного кодекса Таможенного союза были внесены существенные изменения, в том числе введены полномочия таможенных органов по приостановлению выпуска товаров по собственной инициативе. На рис. 1 изображена схема таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС.

В 2010 году было проведено исследование Высшей школы экономики, касающееся борьбы с контрафактной продукцией на российском рынке потребительских товаров [3]. В исследовании отмечается, что на этот момент таможенный реестр является основным средством защиты прав на ИС, особенно в части контрафактной продукции. В 2004–2005 гг. Федеральная таможенная служба обработала 170 заявлений о включении в таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности. По 23 заявлениям был отказ, так как данные заявления содержали патенты на изобретения, что не является предметом таможенного контроля. В середине 2004 года в реестре было 122 объекта, в конце 2005 г. – 488 объектов.

К началу 2010 года в таможенном реестре содержится 1838 объектов интеллектуальной собственности, из них 1811 товарных знаков, 26 объектов авторского права, 1 наименование места происхождения товаров. Хотя количество объектов растёт, данные показатели слишком малы по сравнению с количеством зарегистрированных товарных знаков в Роспатенте (Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам), где в начале 2015 года зарегистрировано больше пятисот тысяч объектов. Статистика регистрации объектов ИС (на примере товарных знаков) в таможенном реестре и в Роспатенте представлена в табл. 1.

Сравнительная характеристика положений системы таможенного контроля РФ с Соглашением ТРИПС. Соглашение по торговым аспектам ИС (далее – Соглашение) [6] как одно из базовых соглашений Всемирной торговой организации является основой для создания нормативно-правовых актов стран – членов организации в области защиты объектов ИС. Таможенный контроль в данном Соглашении играет немаловажную роль.

При проведении сравнительной характеристики Соглашения ТРИПС в области защиты объектов ИС при пересечении границы с системой таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС, в Российской Федерации были выявлены существенные различия. Далее в работе пойдет речь о конкретных различиях этих систем, а также, в какой степени повлияют последующие изменения данных моментов на работу Федеральной таможенной службы и в общем на сферу защиты ИС в РФ.

Для наглядности конкретные различия Соглашения ТРИПС и российской таможенной системы будут представлены в виде табл. 2–4.

Ввиду особого положения объектов ИС и их различий в сравнении друг с другом таможенные органы принимают заявления и информацию строго обособленно в отношении каждого вида объектов ИС. В настоящее время список таких объектов насчитывает не все виды ИС.

Это приводит к ухудшению работы таможенных органов в области защиты ИС в связи с тем, что список товаров, выпуск которых может быть приостановлен, значительно сокращён в сравнении с положениями Соглашения ТРИПС. В него не входят промышленные образцы, патенты, топологии микросхем, закрытая информация.

На практике контроль за товарами, содержащими вышеприведенные объекты ИС, является трудоемким и комплексным процессом. Однако в отношении патентов, промышленных образцов и топологий микросхем ввиду наличия материально-вещественной формы таможенный контроль при пересечении границы вполне осуществим.

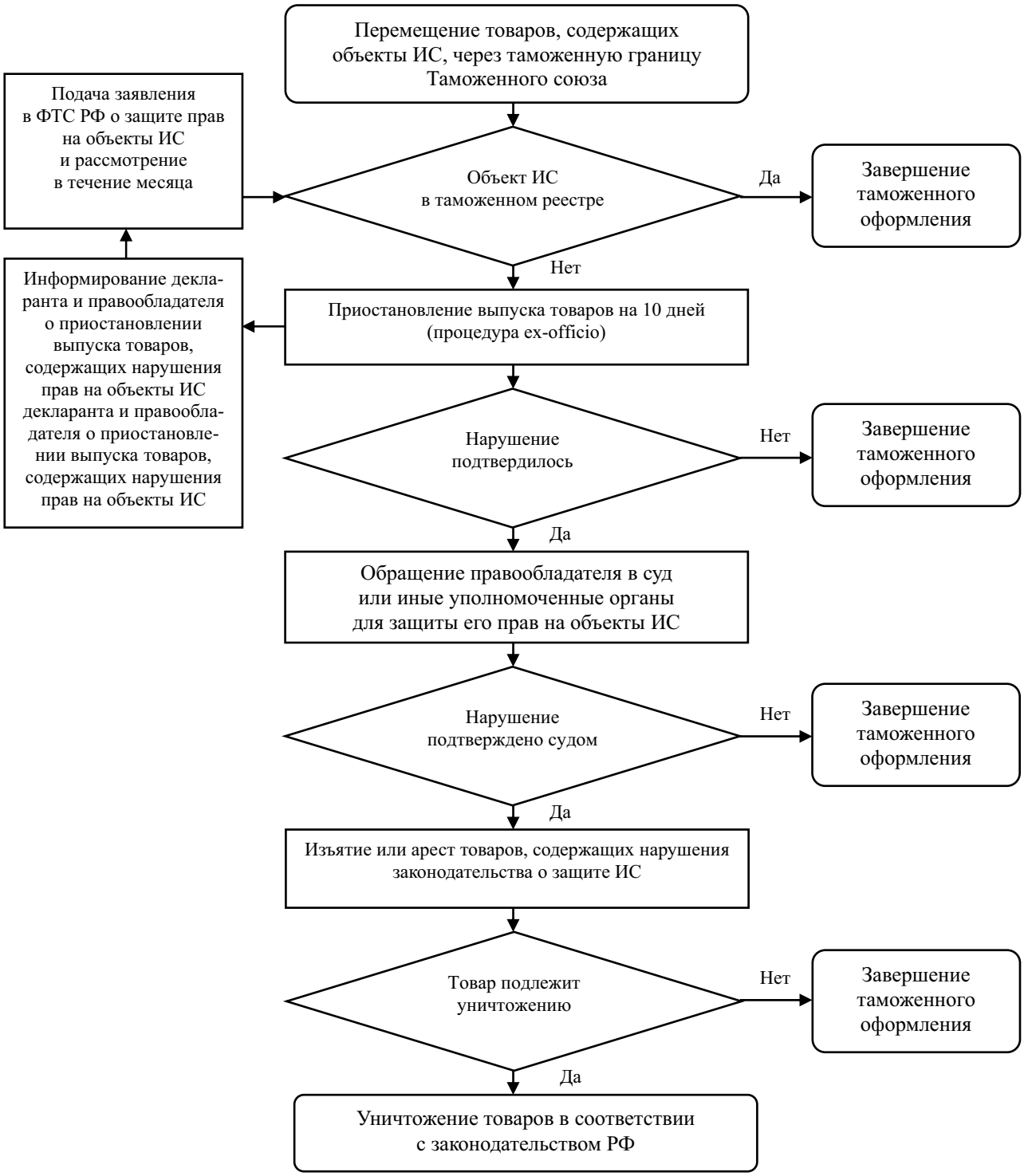


Рис. 1. Система таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС РФ

Таблица 1

Динамика регистрации объектов интеллектуальной собственности в таможенном реестре и Роспатенте

Год	Таможенный реестр [4]		Роспатент [5]	
	Регистраций за год	Всего	Регистраций за год	Всего
2004	404	404	27540	138409
2005	148	552	29447	167856
2006	223	775	29199	197055
2007	205	980	30724	207562
2008	355	1335	36617	222208
2009	239	1574	36436	246607

Окончание табл. 1

Год	Таможенный реестр [4]		Роспатент [5]	
	Регистраций за год	Всего	Регистраций за год	Всего
2010	264	1838	35178	268165
2011	418	2257	35954	281784
2012	322	2580	40106	296631
2013	487	3068	37813	312392
2014	487	3556	–	–
02.2015	13	3570	–	–

Таблица 2

Объекты интеллектуальной собственности

Система таможенного контроля РФ	Система таможенного контроля ТРИПС
В системе таможенного контроля РФ существуют три объекта интеллектуальной собственности (п. 2 ст. 305 Закона «О таможенном регулировании») [7]: – объекты авторского права и смежных прав; – товарные знаки и знаки обслуживания; – наименования мест происхождения товаров	Соглашение ТРИПС описывает 7 объектов интеллектуальной собственности, что также относится и к таможенному контролю: – объекты авторского права и смежных прав; – товарные знаки; – географические указания; – промышленные образцы; – патенты; – топологии интегральных микросхем; – закрытая информация

Таблица 3

Уплата таможенных сборов

Система таможенного контроля РФ	Система таможенного контроля ТРИПС
При подаче заявления правообладателем о включении объектов интеллектуальной собственности в таможенный реестр уплата сборов не производится (п. 1 ст. 307 Закона «О таможенном регулировании») [1]	Соглашение ТРИПС не содержит обязательств по уплате каких-либо сборов

Таблица 4

Принцип ex-officio

Система таможенного контроля РФ	Система таможенного контроля ТРИПС
Таможенный кодекс Таможенного союза и Закон РФ «О таможенном регулировании», принятые в 2010 г., уполномочили таможенные органы при обнаружении признаков правонарушения приостанавливать выпуск товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, не внесенные в таможенный реестр. Таможенные органы имеют право запрашивать необходимую информацию у правообладателя, а также несут ответственность за неправомерные действия должностных лиц	Ст. 58 Соглашения ТРИПС предусматривает меры по приостановлению выпуска товаров, обладающих признаками контрафактных, по инициативе властей (процедура ex-officio). Власти могут запросить любую требуемую информацию. При неправомерном осуществлении данных мер должностные лица несут ответственность, за исключением случаев, когда действия совершались «добросовестно».

Таможенные органы пытаются улучшить положение правообладателей, не устанавливая каких-либо сборов за включение объектов ИС в реестр. По нашему мнению, сборы не оказали бы негативного воздействия и, вероятно, могли бы в положительном плане отразиться на защите ИС в РФ. Сбор за включение объекта ИС в таможенный реестр мог бы компенсировать затраты таможенных органов в области защиты объектов ИС, что, в свою очередь, могло повлиять на качество такой защиты. Этот сбор выполнял бы и фискальную функцию.

Действия должностных лиц таможенных органов по собственной инициативе крайне необходимы. Ранее таможенные органы не имели права на приостановление выпуска товаров, отсутствующих в таможенном реестре. Таможенные органы могли назначить камеральную или выездную проверку, но это занимало немалые сроки, что негативно влияло на эффективность работы в данной области таможенного контроля товаров.

Весомую роль играют сроки внесения объекта ИС в таможенный реестр. Сейчас срок рассмотрения заявления правообладателя и принятия решения о внесении объекта ИС в таможенный реестр составляет один месяц. Это относится и к приостановлению выпуска товаров по процедуре ex-officio и последующей подаче заявления о внесении объекта в таможенный реестр.

На сегодняшний день развитие технологий и накопленный опыт ФТС России указывают на то, что сроки внесения объектов ИС в таможенный реестр должны быть сокращены до минимально возможных. При этом, если применяется процедура ex-officio, введение ускоренной процедуры внесения объекта

в таможенный реестр положительно бы повлияло на эффективность работы таможенных органов в сфере защиты ИС.

Разработка методических положений по совершенствованию системы таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС. Проведя анализ системы таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС, в РФ, а также положений Соглашения ТРИПС, можно предложить следующие положения и рекомендации для дальнейшего развития сферы защиты объектов ИС в РФ.

1. Расширение списка объектов ИС, подлежащих таможенному контролю. Количество объектов ИС, подлежащих таможенному контролю, является одним из главных факторов, влияющих на эффективность защиты ИС таможенными органами РФ. Более полный список объектов ИС расширит влияние таможенного контроля на дополнительные группы товаров, что в лучшую сторону скажется на борьбе с нарушениями в области защиты ИС.

Всемирная таможенная организация (Совет таможенного сотрудничества) (ВТО/СТС) при перечислении объектов ИС, подлежащих защите таможенными органами, не ставит ограничений по расширению данного списка. При этом вводится новый объект таможенного контроля при пересечении таможенной границы – устройства для взлома паролей и иных средств защиты информации. Более широко раскрывается порядок таможенного контроля наименований мест происхождения товаров [8].

Поэтому можно считать, что таможенные органы могут контролировать на границе любой товар, содержащий какой-либо из возможных объектов ИС.

На основании положений Соглашения ТРИПС, норм модели законодательства ВТО/СТС и опыта других стран, список объектов ИС, в отношении которых таможенные органы могут применять защитные меры, должен быть расширен. Данные изменения несут фундаментальный характер и в связи с этим могут вводиться постепенно.

Важнейшим объектом ИС, который не защищается таможенным органами, является патент. Другие объекты ИС также могут быть включены в список защищаемых, ведь каждый из них имеет нормативную базу по защите непосредственно на территории РФ. Эта нормативная база может стать основой для разработки положений о внесении данных объектов в таможенный реестр объектов ИС с учетом их особенностей.

Далее рассмотрим возможность внесения патентов в список объектов ИС, подлежащих таможенному контролю в РФ на современном этапе.

Объектами патентного права считаются результаты интеллектуальной деятельности, соответствующие требованиям к изобретениям и полезным моделям, установленным Гражданским кодексом РФ (ГК РФ), а также результаты интеллектуальной деятельности в области графического проектирования, отвечающие требованиям к промышленным образцам в соответствии с ГК РФ.

Следующие объекты не подлежат патентованию (ст. 1349 ГК РФ): способы клонирования человека; способы модификации генетической целостности клеток зародышевой линии человека; использование человеческих эмбрионов в промышленных и коммерческих целях; иные решения, противоречащие общественным интересам, принципам гуманности и морали [9].

Патент на изобретение охраняет техническое решение в какой-либо области в отношении продукта (устройства, вещества, штамма микроорганизма и пр.) либо способа (процесса воздействия на объект при помощи определенных методов и средств). Он имеет действие в течение 20 лет с момента подачи заявки на выдачу патента.

Для выдачи патента изобретение должно соответствовать трем основным критериям патентоспособности:

– новизна (изобретение не известно из существующего уровня техники);

– наличие изобретательского уровня (решение является неочевидным для специалиста в соответствующей области техники);

– промышленная применимость (возможность использования изобретения в промышленности, здравоохранении, сельском хозяйстве и пр.).

Государственная экспертиза выявляет наличие трех данных критериев, и при выполнении всех прочих условий заявителю выдаётся патент на изобретение.

Патент на полезную модель охраняет техническое решение в отношении какого-либо устройства. В данном случае патент выдается при наличии новизны модели и ее промышленной применимости. Требование изобретательского уровня не предъявляется к полезной модели, в связи с чем любое устройство, даже очевидное для специалиста в означенной области техники, может охраняться патентом. Оформление заявки на такой патент происходит аналогично патенту на изобретение.

Патент на промышленный образец охраняет решение промышленного или кустарно-ремесленного производства, описывающее внешний вид изделия. Во многих западных странах промышленный образец называют дизайном. Промышленный образец должен обладать признаками оригинальности и новизны в части эстетических и эргономических свойств изделия и его внешнего вида (рисунок, орнамент, форма и пр.). Патентом на промышленный образец охраняется внешний вид изделия, оправданность его форм, целостность и эргономичность исполнения.

Далее рассмотрено внесение изменений в приказ Федеральной таможенной службы РФ от 13.08.2009 г. № 1488 «Об утверждении Административного регламента Федеральной таможенной службы по исполнению государственной функции по ведению таможенного реестра объектов ИС» [10].

В приложение № 1 «Перечень сведений об объектах ИС, указываемых при подаче заявления о принятии таможенными органами мер, связанных с приостановлением выпуска товаров» следует добавить следующий пункт:

«Для патентов на изобретение, полезную модель и промышленный образец:

– патент на изобретение, полезную модель или промышленный образец;

– графическое изображение патентуемого изделия;

– информация о документе, подтверждающем введение правообладателем или при его согласии изделия в гражданский оборот в РФ;

– информация о лицензиях и лицензионных договорах, договорах о распоряжении и отчуждении исключительного права на изобретение, полезную модель и промышленный образец;

– информация о договорах коммерческой концессии на изобретение, полезную модель и промышленный образец».

В приложение № 2 «Перечень документов, представляемых в ФТС РФ в качестве подтверждающих наличие прав на объекты ИС при подаче заявления о принятии таможенными органами мер, связанных с приостановлением выпуска товаров», следует добавить следующий пункт:

«Для патентов на изобретение, полезную модель и промышленный образец:

– патент на изобретение, полезную модель или промышленный образец;

– документ, содержащий сведения о патенте из соответствующих реестров Роспатента;

– лицензии и лицензионные договоры, договоры о распоряжении и отчуждении исключительного права на изобретение, полезную модель и промышленный образец;

– договоры коммерческой концессии на изобретение, полезную модель и промышленный образец;

– документ, подтверждающий введение правообладателем или при его согласии изделия в гражданский оборот в РФ».

2. Таможенный сбор за внесение объекта ИС в таможенный реестр. В отношении данного аспекта важно отметить международный опыт. В КНР существует сбор за внесение объекта ИС в реестр, а также плата при приостановлении выпуска контрафактных товаров. Всемирная таможенная организация также дает возможность введения таможенных сборов для компенсирования затрат таможенных органов в области защиты ИС.

Таможенные органы при осуществлении деятельности по защите объектов ИС несут административные расходы, связанные с рассмотрением заявления и внесением объектов ИС в таможенный реестр. Также сюда можно отнести заработные платы должностных лиц и другие сопутствующие расходы. В связи с этим введение таможенного сбора могло бы положительно повлиять на эффективность работы таможенных органов в данной сфере.

Одной из основных функций таможенных органов является пополнение федерального бюджета. Таможенные платежи ранее составляли не менее 40 % от общего поступления в бюджет, а с 2010 года одновременно с созданием Таможенного союза объем таможенных платежей, перечисленных в федеральный бюджет, превысил планку в 50 % от общего объема. Таможенные органы эффективно исполняют фискальную функцию, что отражено в статистике ФТС России [11] на рис. 2 и 3.

Актуальность введения сбора важна ввиду вступления РФ в ВТО, что в дальнейшем приведет к снижению ставок таможенных пошлин и налогов. Описываемый далее таможенный сбор призван улучшить показатели пополнения федерального бюджета, а также компенсировать возможный ущерб бюджету в связи с уменьшением ставок таможенных пошлин. При этом возможен вариант, когда поступающие денежные средства можно направить в фонд обеспечения деятельности таможенных органов по защите объектов интеллектуальной собственности, включая технические средства и заработную плату должностных лиц.

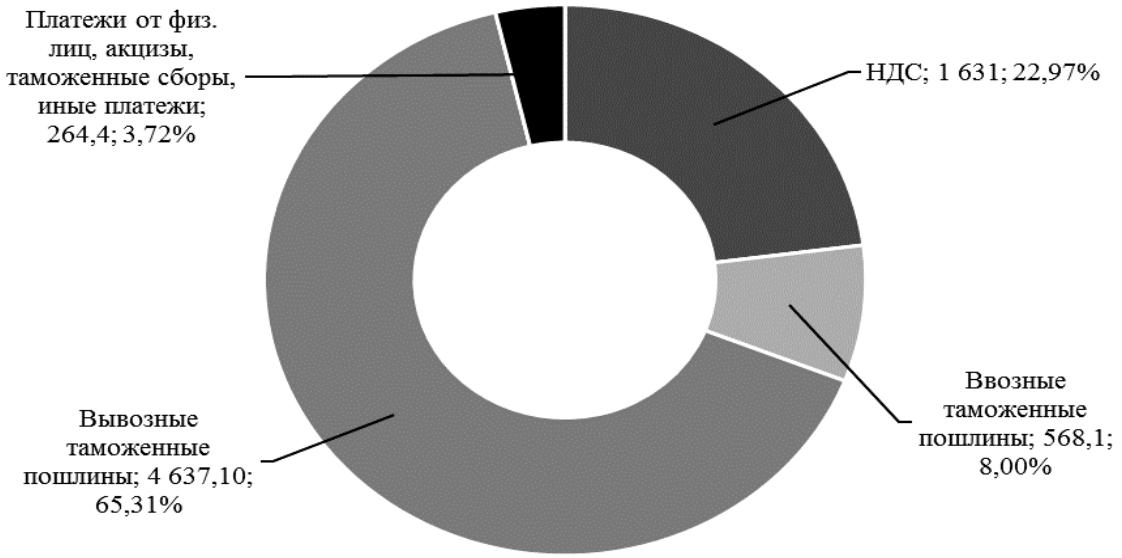


Рис. 2. Перечисление таможенных платежей в федеральный бюджет в 2014 г., млрд руб.

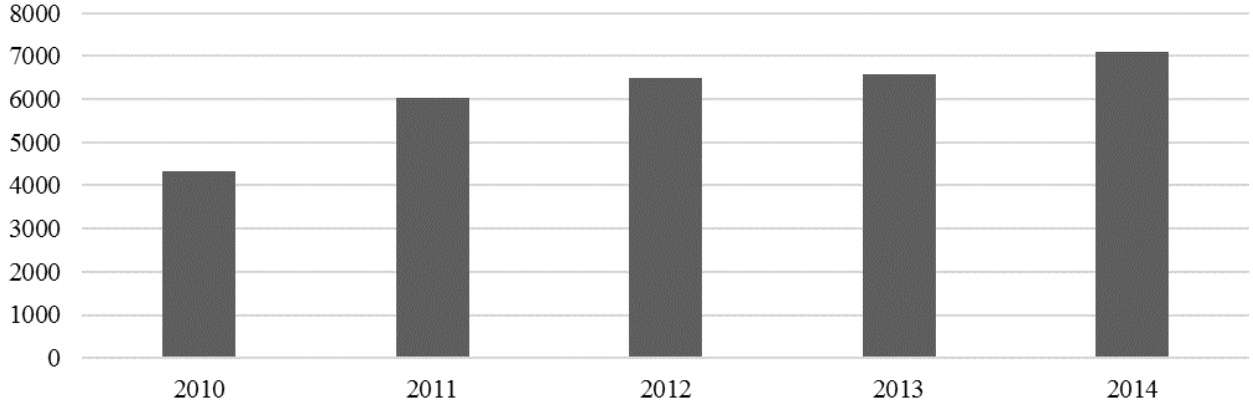


Рис. 3. Динамика перечислений таможенных платежей
в федеральный бюджет в 2010–2014 гг.

Важно определить размер такого сбора и базу его начисления. Сбор не должен стать препятствием для деятельности правообладателей, при этом назначенная ему функция должна выполняться в полной мере. Приведем расчеты для оценки экономической выгоды как государства в целом, так и таможенных органов в частности.

Таможенный сбор за внесение объекта ИС в реестр может иметь фиксированный размер за одно заявление, содержащее только один объект интеллектуальной собственности. При этом возможен вариант, когда в заявлении может быть несколько объектов ИС, и за последующие объекты, кроме первого, будет взиматься дополнительная плата в размере определенного процента от основного сбора. Также в целях стимулирования российских правообладателей размер сбора можно уменьшить для резидентов, как, например, делает Роспатент.

Предположим, что таможенный сбор за первый объект ИС в заявлении имеет фиксированную величину, а последующие объекты – уменьшенную в сравнении с первым. Также сборы имеют разную величину для резидентов и нерезидентов.

Далее представлена формула для расчета таможенного сбора:

$$a = (b + c \cdot n) \cdot d,$$

где a – величина таможенного сбора по конкретному заявлению; b – величина таможенного сбора за первый объект в заявлении; c – величина таможенного сбора за последующие объекты в заявлении; d – коэффициент увеличения (уменьшения) сбора для различных лиц; n – количество дополнительных объектов в заявлении.

Размер сборов может зависеть от многих факторов, в том числе от затрат таможенных органов на рассмотрение заявления, вынесение решения, средства связи, заработную плату сотрудников и т. д. Также сюда можно отнести и дополнительную накопительную часть средств для расходов на дальнейшее совершенствование системы таможенного контроля объектов ИС. Для сравнения приведем пример, как рассчитываются патентные и иные пошлины в Роспатенте [12].

Стоимость рассмотрения Роспатентом заявлений на регистрацию патента на изобретение и принятие по ним решений составляет 1650 руб. (+ 250 руб. за каждый пункт формулы изобретения свыше 25), на полезную модель 850 руб. (+ 100 руб. за каждый пункт формулы полезной модели свыше 25), на промышленный образец 850 руб. (+ 100 руб. за каждый пункт перечня существенных признаков промышленного образца свыше 1), товарного знака и знака обслуживания 2700 руб.

Патентные пошлины до определённого времени имели разную величину для резидентов и нерезидентов РФ. Решением Высшего арбитражного суда РФ от 28.08.2012 г. № ВАС-5123/12 [13] дифференциация пошлин была отменена. Поводом для рассмотрения дела явилось заявление предпринимателя Яна Топола (Чешская Республика) к Правительству РФ. Суд удовлетворил требования иностранца, признав, что нормативный акт противоречит нормам международного права [14].

Представленная выше формула отражает ситуацию, когда законодательством установлена фиксированная величина таможенного сбора за первый объект в заявлении и уменьшенная величина за последующие. Также в формуле присутствует коэффициент увеличения или уменьшения сбора для различных субъектов защиты ИС, таких как резиденты и нерезиденты, физические и юридические лица, правообладатели, имеющие льготы, молодые преподаватели и ученые и т. д. При этом, как было упомянуто выше, дифференциация пошлин для резидентов и нерезидентов противоречит нормам международного права, но экономическая и политическая ситуация непрерывно изменяется, что может быть необходимо учесть в дальнейшем.

На примере пошлин Роспатента можно провести пробные расчеты для показания экономической эффективности таможенного сбора за внесение объекта ИС в таможенный реестр. Установим, например, величину сбора за первый объект ИС в заявлении

2000 руб., последующие – 1000 руб. Допустим, юридическое лицо подает заявление на внесение 3 объектов ИС в таможенный реестр, при этом коэффициент изменения равен 1:

$$\text{Таможенный сбор} = (2000\ \text{руб.} + 1000\ \text{руб.} \cdot 2) \cdot 1 = 4000\ \text{руб.}$$

Далее следует рассмотреть возможное количество подаваемых заявлений на внесение объектов ИС в таможенный реестр. В теории количество заявлений напрямую связано с количеством зарегистрированных Роспатентом объектов ИС, вовлеченных во внешнеэкономическую деятельность. В связи с этим, чем больше объектов будет внесено в реестр, тем более эффективно будет осуществляться таможенный контроль за перемещением через таможенную границу товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности. При внесении объекта в реестр предоставляется полная информация, способствующая предотвращению правонарушений в сфере защиты ИС.

Для начала следует определить количество зарегистрированных объектов ИС в Роспатенте. По данным, опубликованным на сайте Федерального института промышленной собственности [15], на март 2015 г. общее количество зарегистрированных патентов составляет 553104 объекта, полезных моделей – 151156, промышленных образцов – 55821, товарных знаков – 462577. Общее количество составляет 1222658 объектов ИС.

Предположим, что по крайней мере половина из этих объектов является вовлеченной в ВЭД, что составляет 611329 объектов. Также можно сделать допущение, что не менее 50 % от количества вовлеченных в ВЭД объектов ИС будет вноситься в таможенный реестр (305664). Данные допущения основываются на появлении процедуры ex-officio, а также на предложении авторов о введении ускоренной процедуры внесения объектов ИС в таможенный реестр.

Для расчета единовременной экономической выгоды воспользуемся простой формулой

$$\text{Экономическая выгода} = \text{Таможенный сбор} \cdot \text{Количество заявлений.}$$

Величину таможенного сбора возьмем из представленных выше расчетов. Количество потенциальных заявлений представлено в анализе данных Роспатента выше:

$$\text{Экономическая выгода} = 4000\ \text{руб.} \cdot 305664 = 1222656000\ \text{руб.}$$

Получившийся результат является вполне существенным для обеспечения деятельности таможенной органов по защите объектов ИС, а также для пополнения доходной части федерального бюджета РФ.

При расчете экономической выгоды важно учесть, что заявление о внесении объекта ИС в таможенный реестр имеет ограниченный срок действия. Соответственно, таможенные органы применяют меры по защите объектов ИС в течение данного срока. На данный момент российским законодательством установлен срок 2 года с возможностью многократного продления срока защиты на 2 года (ст. 329 Таможенного кодекса Таможенного союза). Исходя из вышесказанного, каждый определенный срок экономическая выгода будет возобновляться.

Подводя итоги по данному вопросу, с уверенностью можно сказать, что введение сбора положительно отразится на защите объектов интеллектуальной собственности таможенными органами РФ, а также станет экономически выгодным для государства в целом и Федеральной таможенной службы в частности.

3. Процедура ex-officio. С введением процедуры ex-officio полномочия таможенных органов в части контроля товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, расширились. При этом оперативность действий осталась в прежнем состоянии. Предлагается сократить срок рассмотрения заявления до 5 рабочих дней, что на сегодняшний день вполне возможно ввиду развития средств связи и введения электронного декларирования. Этот срок идеально подходит для рассмотрения должностным лицом заявления и незамедлительной защиты интересов правообладателя. На рис. 4 показана улучшенная система таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС.

В современной обстановке сроки ответных действий таможенных органов в области защиты ИС должны быть уменьшены. После внесения изменений, по нашему мнению, больше правообладателей будут обращаться в таможенные органы для защиты своих интересов, и большее количество объектов ИС будет внесено в таможенный реестр. Ввиду предложений о введении таможенного сбора, описанного выше, это также приведет к привлечению дополнительных средств для развития системы таможенного контроля объектов ИС и пополнению федерального бюджета.

Заключение. Решение представленных выше проблем позволит повысить качественный уровень работы системы таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС.

Система таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС, сформирована и функционирует. Имеются положительные результаты в работе таможенных органов в данной области. При этом ввиду по-прежнему высокого уровня контрафактности продукции, перемещаемой через таможенную границу Таможенного союза, Федеральная таможенная служба РФ не останавливается на достигнутом. Проведя анализ работы таможенных органов, можно увидеть стремление к дальнейшим дополнениям и изменениям данной системы для достижения более крупных и важных результатов в качественных и количественных характеристиках работы ФТС в целом и системы таможенного контроля товаров, содержащих объекты интеллектуальной собственности, в частности.

Положительные результаты работы таможенных органов в области защиты ИС положительно повлияют на экономику РФ, а также составят привлекательный образ нашей страны в международном сообществе.

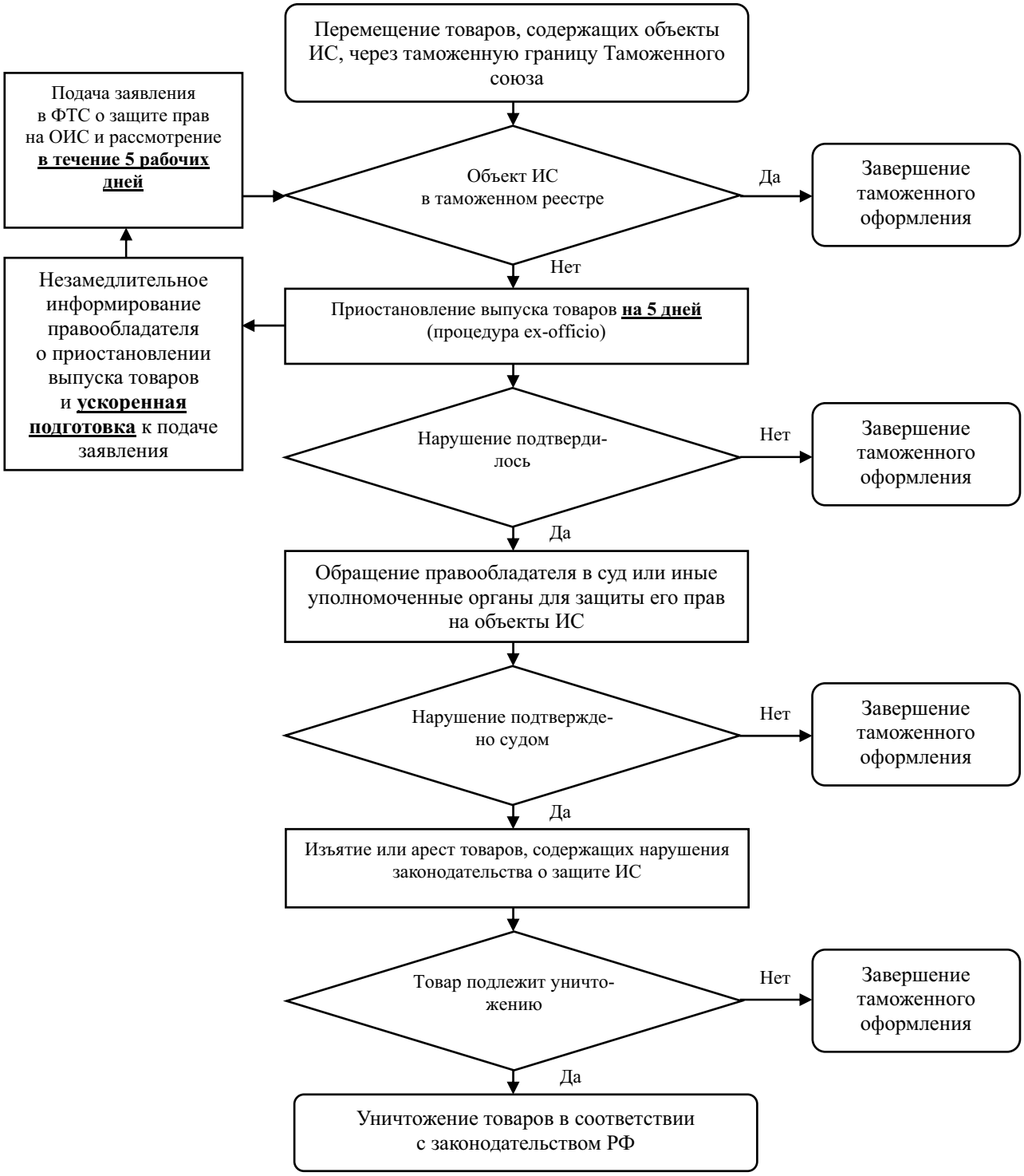


Рис. 4. Усовершенствованная система таможенного контроля товаров, содержащих объекты ИС

Библиографические ссылки

1. О таможенном регулировании в Российской Федерации : федер. закон № 311-ФЗ от 27.11.2010 г. [Электронный ресурс] // Консультант Плюс : офиц. сайт. 13.07.2015 г. URL. http://www.consultant.ru/popular/custom_new/ (дата обращения: 05.10.2015).

2. Соглашение о единых принципах регулирования в сфере охраны и защиты прав интеллектуальной собственности : утв. Решением Межгосударственного совета Евразийского экономического сообщества № 65 от 9 декабря 2010 года [Электронный ресурс] // Copyright.ru : офиц. сайт. 09.12.2010 г. URL. http://www.copyright.ru/ru/library/ megdunarodnie_akti/region/soglasheniya_tamogenniy_soyuz/ (дата обращения: 17.09.2015).

3. Основные тенденции на рынках контрафактной продукции и возможное влияние Таможенного союза :

аналит. отчет / отв. ред. В. В. Радаев ; Гос. ун-т – Высшая школа экономики ; Лаб. экон.-социол. исслед. М. : Изд. дом Гос. ун-та – Высшей школы экономики, 2010. 80 с.

4. Таможенный реестр объектов интеллектуальной собственности [Электронный ресурс] // Федеральная таможенная служба РФ : офиц. сайт. 18.03.2015 г. URL. http://ved.customs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=109:2010-09-09-06-26-44&catid=13:2008-10-16-13-51-15&Itemid=1814 (дата обращения: 30.08.2015).

5. Годовой отчет о деятельности Роспатента за 2013 год [Электронный ресурс] // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент) : офиц. сайт. 12.11.2014 г. URL. http://www.rupto.ru/activities/dues/patduty/3b9e1b73-3ee0-11e2-7d07-9c8e9921fb2c (дата обращения: 30.08.2015).

6. Соглашение по торговым аспектам прав интеллектуальной собственности (Соглашение ТРИПС) [Электронный ресурс] // Всемирная организация интеллектуальной собственности : Офиц. сайт. 15.04.1995 г. URL. http://www.wipo.int/wipolex/ru/treaties/text.jsp?file_id=329636 (дата обращения: 04.09.2015).

7. Таможенный кодекс Таможенного союза (ред. от 08.05.2015) [Электронный ресурс] // Консультант Плюс : офиц. сайт. 08.05.2015 г. URL. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94890/ (дата обращения: 23.09.2015).

8. Модель положений для национальных законодательств по обеспечению исполнения справедливых и эффективных мер на границе в соответствии с Соглашением ТРИПС (типовой закон Всемирной таможенной организации от 19 мая 2004 г.) [Электронный ресурс]. 19.05.2004. URL: http://www.tafa-r.org.tw/forum/20110816/20110816WCOModelLawfinal.pdf (дата обращения: 29.08.2015).

9. Гражданский кодекс Российской Федерации. Ч. 4 (в ред. от 13.07.2015) [Электронный ресурс] // Консультант Плюс : офиц. сайт. 13.07.2015 г. URL. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64629/ (дата обращения: 29.09.2015).

10. Об утверждении Административного регламента Федеральной таможенной службы по исполнению государственной функции по ведению таможенного реестра объектов интеллектуальной собственности : приказ Федеральной таможенной службы РФ от 13.08.2009 г. № 1488 [Электронный ресурс] // Федеральная таможенная служба РФ : офиц. сайт. 13.08.2012 г. URL: http://ved.customs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=110:2010-09-09-06-28-00&catid=13:2008-10-16-13-51-15&Itemid=1814 (дата обращения: 20.08.2015).

11. Таможенная служба Российской Федерации в 2014 году [Электронный ресурс] // Федеральная таможенная служба РФ : офиц. сайт. 10.03.2015 г. URL. http://www.customs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=7995&Itemid=1845 (дата обращения: 23.08.2015).

12. Перечень юридически значимых действий, связанных с патентом на изобретение, полезную модель, промышленный образец, с государственной регистрацией товарного знака и знака обслуживания, с государственной регистрацией и предоставлением исключительного права на наименование места происхождения товара, а также с государственной регистрацией перехода исключительных прав к другим лицам и договоров о распоряжении этих прав, за совершение которых взимаются патентные и иные пошлины [Электронный ресурс] // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент) : офиц. сайт. 02.02.2015 г. URL. http://www.rupto.ru/activities/dues/patduty/3b9e1b73-3ee0-11e2-7d07-9c8e9921fb2c (дата обращения: 26.08.2015).

13. Решение Высшего арбитражного суда РФ от 28.08.2012 г. № ВАС-5123/12 [Электронный ресурс] // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент) : офиц. сайт. 28.08.2012 г. URL. http://www.rupto.ru/rupto/nfile/38af4cca-fb64-11e2-ce9e-9c8e9921fb2c/vas_28_08_2012_12.pdf (дата обращения: 27.08.2015).

14. Высший арбитражный суд Российской Федерации признал повышенные размеры патентных пошлин для иностранцев незаконными [Электронный ресурс] // Федеральные арбитражные суды Российской Федерации : офиц. сайт. 07.09.2012 г. URL. http://www.arbitr.ru/press-centr/smi/60484.html (дата обращения: 27.08.2015).

15. Базы данных объектов интеллектуальной собственности, зарегистрированных в Роспатенте [Электронный ресурс] // Федеральный институт промышленной собственности : офиц. сайт. 25.03.2015 г. URL. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/article_2 (дата обращения: 30.08.2015).

References

1. RF Federal Law “On customs regulation in Russian Federation” of 27.11.2010 № 311-FZ (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/popular/custom_new/ (accessed 05.10.2015).

2. *Soglashenie o edinykh printsipakh regulirovaniya v sfere okhrany i zashchity prav intellektual’noy sobstvennosti (utverzhdeno Resheniem Mezhgosudarstvennogo Soveta Evraziyskogo ekonomicheskogo soobshchestva N 65 ot 9 dekabrya 2010 goda).* [The Agreement on the common principles of regulation of protection of intellectual property rights (approved by Resolution of the Interstate Council of the Eurasian Economic Community № 65 of 09.12.2010)]. (In Russ.). Available at: http://www.copyright.ru/ru/library/megdunarodnie_akti/region/ soglasheniya_tamogenniy_soyuz/ (accessed 30.08.2015).

3. *Osnovnye tendentsii na rynkakh kontrafaktnoi produktsii i vozmozhnoe vliyanie Tamozhennogo soyuza* [The main trends in the markets of counterfeit products and the possible impact of the Customs Union]. Moscow, Vysshey shkoly ekonomiki Publ., 2010, 80 p.

4. *Tamozhennyy reestr ob’’ektov intellektual’noy sobstvennosti* [Customs Register of Intellectual Property (In Russ.). Available at: http://ved.customs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=109:2010-09-09-06-26-44&catid=13:2008-10-16-13-51-15&Itemid=1814 (accessed 30.08.2015).

5. *Godovoy otchet o deyatel'nosti Rospatenta za 2013 god* [Annual report on the activities of Rospatent for 2013] (In Russ.). Available at:http://www.rupto.ru/activities/dues/patduty/3b9e1b73-3ee0-11e2-7d07-9c8e9921fb2c (accessed 30.08.2015).

6. *Soglashenie po torgovym aspektam prav intellektual'noy sobstvennosti (Soglashenie TRIPS)* [Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights (TRIPS Agreement)]. Available at: http://www.wipo.int/wipolex/ru/treaties/text.jsp?file_id=329636 (accessed 04.09.2015).

7. *Tamozhennyy kodeks Tamozhennogo soyuza*. [Customs Code of the Customs Union]. (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94890/ (accessed 23.09.2015).

8. Model provisions for national legislation to implement fair and effective border measurers consistent with the agreement on trade-related aspects of intellectual property right (19.05.2004). Available at: http://www.tafa-r.org.tw/forum/20110816/20110816WCOModelLawfinal.pdf (accessed: 29.08.2015).

9. *Grazhdanskiy kodeks Rossiyskoy Federatsii chast' 4.* [Civil Code of the Russian Federation part 4]. (In Russ.). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64629/ (accessed 29.09.2015).

10. *Prikaz Federal'noy tamozhennoy sluzhby RF ot 13.08.2009 g. №1488 "Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta Federal'noy tamozhennoy sluzhby po ispolneniyu gosudarstvennoy funktsii po vedeniyu tamozhennogo reestra ob''ektov intellektual'noy sobstvennosti"* [Order of the Russian Federal Customs Service for 13.08.2009 №1488 "On approval of the Administrative Regulation of the Federal Customs Service for the execution of the state function of jurisdiction of the customs registry of intellectual property"]. (In Russ.). Available at: http://ved.customs.ru/index.php?option=com_content&view= article&id=110:2010-09-09-06-28-00&catid=13:2008-10-16-13-51-15&Itemid=1814 (accessed 20.08.2015).

11. *Tamozhennaya sluzhba Rossiyskoy Federatsii v 2014 godu* [Customs Service of the Russian Federation in 2014]. (In Russ.). Available at: http://www.customs.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=7995&Itemid=1845 (accessed 23.08.2015).

12. *Perechen' yuridicheski znachimykh deystviy, svyazannykh s patentom na izobretenie, poleznuyu model', promyshlennyy obrazets, s gosudarstvennoy registratsiey tovarnogo znaka i znaka obsluzhivaniya, s gosudarstvennoy registratsiey i predostavleniem isklyuchitel'nogo prava na naimenovanie mesta proiskhozhdeniya tovara, a takzhe s gosudarstvennoy registratsiey perekhoda isklyuchitel'nykh prav k drugim litsam i dogovorov o rasporyazhenii etimi pravami, za sovershenie kotorykh vzimayutsya patentnye i inye poshliny* [The list of legal actions related to a patent for an invention, utility model, industrial design, with state registration of trademark and service mark, with the state registration and granting the exclusive right to the appellation of origin, as well as with the state registration of the transfer of exclusive rights to the other persons and agreements on the disposal of these rights, for which fees are patent and other duties]. (In Russ.). Available at: http://www.rupto.ru/activities/dues/patduty/3b9e1b73-3ee0-11e2-7d07-9c8e9921fb2c (accessed 26.08.2015).

13. *Reshenie Vysshego Arbitrazhnogo Suda RF ot 28.08.2012 g. № VAS-5123/12* [The decision of the Supreme Arbitration Court of the Russian Federation of 28.08.2012 №VAS-5123/12]. (In Russ.). Available at: http://www.rupto.ru/rupto/nfile/38af4cca-fb64-11e2-ce9e-9c8e9921fb2c/vas_28_08_2012_12.pdf (accessed 27.08.2015).

14. *Vysshiy Arbitrazhnyy Sud Rossiyskoy federatsii priznal povyshennye razmery patentnykh poshlin dlya inostrantsev nezakonnymi* [The Supreme Arbitration Court of the Russian Federation acknowledged the increased sizes of patent fees for illegal aliens]. (In Russ.). Available at: http://www.arbitr.ru/press-centr/smi/60484.html (accessed 27.08.2015).

15. *Bazy dannykh ob''ektov intellektual'noy sobstvennosti, zaregistrirovannykh v Rospatente* [Databases of Intellectual Property registered in Rospatent]. (In Russ.). Available at: http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/inform_retrieval_system/article_2 (accessed 30.08.2015).

© Сенашов С. И., Рудь С. Н., 2015

УДК 338.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1060–1066

СБАЛАНСИРОВАННОЕ РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ И ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р. С. Сердюк*, Л. В. Ерыгина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: advent89@mail.ru

В последнее десятилетие ключевыми факторами развития отечественных предприятий ракетно-космической промышленности стали реорганизация системы управления отраслью, проникновение предприятий на коммерческие рынки и увеличившееся государственное финансирование. По мере развития космических технологий и стремления человечества коммерциализировать космос, для удержания лидерства в этой сфере России необходимо осваивать мировые коммерческие рынки космической продукции и услуг. Факторами, препятствующими эффективному захвату коммерческих рынков, являются недостаточность инвестиционных ресурсов для реализации всех перспективных и революционных проектов, отсутствие сбалансированности в инновационно-инвестиционной деятельности и последующее невыполнение сроков поставки готовой продукции.

Это ставит задачу грамотного выбора инновационных проектов, поиска источников инвестиционных ресурсов и эффективного согласования инвестиционных потоков и этапов инновационной деятельности. Проведено исследование теоретических положений в определении сущности инноваций и инновационного процесса, инвестиций и инвестиционного процесса, которое позволило сформулировать понятие инновационной и инвестиционной деятельности на предприятиях ракетно-космической промышленности. Исследование особенностей деятельности предприятий ракетно-космической промышленности помогло выделить ключевые характеристики инвестиционной и инновационной деятельности, благодаря чему была определена сущность сбалансированности инвестиционной и инновационной деятельности применительно к их специфике. Это позволило наиболее точно определить цель сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности на предприятиях РКП, которая заключается в повышении эффективности деятельности предприятия и захвате коммерческих рынков за счёт реализации конкурентоспособной инновационной продукции и увеличения рентабельности вложений, а также в сохранении квалификации кадров и эффективном и своевременном обновлении производственных фондов. Сделан вывод о том, что создание механизма планирования сбалансированности инновационной и инвестиционной деятельности предполагает выработку такого подхода, который позволит гармонизировать цели предприятий РКП и обеспечить структурированность показателей эффективности.

Ключевые слова: инновационная деятельность, инвестиционная деятельность, сбалансированность, предприятия ракетно-космической промышленности.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1060–1066

BALANCED DEVELOPMENT OF INNOVATION AND INVESTMENT IN THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

R. S. Serdyuk*, L. V. Erygina

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: advent89@mail.ru

Reorganization of the rocker and space industry management, the penetration of the Russian enterprises in the commercial market and increase of federal funding were the key factors in the development of Russian rocket and space industry enterprises in the last decade. With the development of space technologies and the desire of mankind to commercialize space, Russia needs to develop global commercial market of space products and services to hold the lead in space industry. Obstacles for efficient capture of commercial markets is the lack of investment resources for the implementation of advanced and revolutionary projects, the lack of balance in the innovation and investment and the subsequent failure to complete product development in time.

This sets the problem of a proper choice of innovative projects, search for sources of investment and effective coordination of investment flows and stages of innovation. The study of theoretical positions in determining the nature of innovation and the innovation process, investments and the investment process has allowed to formulate the concept of innovation and investment in the rocket and space industry. Investigation of the features of Russian rocket and space industry enterprises helped to identify the key characteristics of their investment and innovation activities, so the balance was determined by the nature of the investment and innovation with regard to their specificity. This allowed to most accurately define the goal of balanced development of innovation and investment in the RCP, which is to increase the effectiveness of the company and capture of commercial markets through the introduction of a competitive innovative products and increasing the profitability of investments, as well as in the preservation of skills and effective and timely updating of production assets. It is concluded that the creation of a planning innovation and investment activity balance involves the development of approach, which will allow companies to harmonize the goals of the RCP and to provide structured performance.

Keywords: innovative activity, investment activity, balance, rocket and space industry.

Введение. Реализация в экономике Российской Федерации модели инновационного развития вместе с использованием традиционного энергосырьевого сектора предполагает создание новых условий экономического роста, основанных на высокотехнологичных отраслях экономики и наращивании человеческого потенциала. Важное значение в решении этой задачи имеет ракетно-космическая промышленность (РКП), обладающая высокой наукоёмкостью и серьёзным инновационным потенциалом.

Ракетно-космическая промышленность сегодня – это около 100 предприятий, 48 из которых объединены в 10 интегрированных структур. На предприятиях РКП занято около 300000 человек. Средний возраст инженерно-технических сотрудников превышает 45 лет, при этом в научных организациях достигает и 60. Основные фонды истощены, оборудования младше 10 лет – менее 10 % [1]. Несмотря на некоторые негативные факты, РКП на данный момент – это лидер в инновационных технологиях страны, основной поставщик наукоёмких и технически сложных изделий. Россия продолжает оставаться ведущей космической державой, совершая больше всего пусков ракетносителей в год и осуществляя интенсивную космическую деятельность. Однако стоит отметить, что на мировом коммерческом рынке (исключая пусковые услуги) доля отечественных предприятий составляет 0,6 %, что связано с общей неразвитостью отечественной электронной и компонентной базы, низким уровнем электроники Space и Military, наличием качественных и зачастую более дешёвых предложений со стороны многочисленных конкурентов [2]. Для успешного покорения коммерческого космического рынка, опережающего роста отрасли и устранения недостатков существующих технологий предприятия ракетно-космической промышленности должны непрерывно создавать инновационные заделы научно-технического, технологического характера и постоянно совершенствовать производимую продукцию.

Непрерывный инновационный процесс требует аккумулирования значительного объёма ресурсов. Во времена СССР РКП полностью финансировалась за счёт государства. С приходом капитализма существующая парадигма управления и финансирования космической отрасли изменилась: теперь большая часть самостоятельных разработок предприятий РКП финансируется за счёт собственных средств, получаемых за счёт реализации производимой продукции и услуг, что ставит предприятие перед нелёгким выбором распределения ограниченных инвестиционных ресурсов по инновационным проектам.

Таким образом, дисбаланс нынешнего состояния ракетно-космической промышленности и современных требований к ней приводит к тому, что обеспечение сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности на предприятиях ракетно-космической промышленности является актуальной научной задачей, решение которой имеет важное народно-хозяйственное значение. Это не только поддержание обороноспособности страны, но и увеличение доли отечественных предприятий на международных коммерческих рынках космической продукции и услуг.

При планировании сбалансированного развития инвестиционной и инновационной деятельности ракетно-космической промышленности важно чётко определить, что такое инновационная деятельность и инвестиционная деятельность, а также, что означает их сбалансированность.

Сущность термина «инновация». Впервые термин «инновация» встречается во французском языке в конце XIII века, в английском – в XVI веке и определяет появление новшеств в социально-культурных сферах деятельности. В начале XX в. термин «инновация» был воспринят экономической наукой. Большой вклад в развитие этого понятия внесли зарубежные экономисты Ж. Кондорсе, К. Маркс, Д. Рикардо, А. Смит [3–6]. Сущность инноваций Ж. Кондорсэ обозначил как взаимосвязь науки и промышленности, вместе с этим Д. Рикардо исследовал воздействие инноваций в развитии земледелия, К. Маркс же в 3 томе «Капитала» рассматривает инновации как направленное «удешевление элементов постоянного капитала». Как экономическую категорию термин «инновация» ввел в научный оборот Й. Шумпетер [7]. В 1912 году в своей работе «Теория экономического развития» под понятием «инновация» он понимает введение новых процессов, открытие новых рынков, введение новых организационных форм; более того, он связывает это понятие с бизнесом. Стоит отметить, что определение, данное Шумпетером, не является исчерпывающим. В экономической литературе, как отечественной, так и зарубежной, существует множество трактовок понятия «инновация», что означает отсутствие единой терминологии в этой области. Зачастую

авторы вкладывают различный смысл в понятие «инновации». Приведенные в табл. 1 определения сформировали фундаментальные основы теории инноваций.

С развитием науки расширялись и границы познания сущности инновационной деятельности. Наиболее полные определения появляются во второй половине XX века, когда термин «инновации» изучали такие учёные-экономисты, как А. Койре, П. Завлин, Н. И. Лапин, Б. Санто, Р. А. Фатхуддинов, чьи мнения отражены в табл. 2.

Анализируя вышеизложенные мнения, можно сделать вывод, что инновация – это результат качественного изменения, возникающий благодаря внедрению новых технологий, изделий, направленный на удовлетворение потребностей и дающий полезный экономический эффект. Инновация не может быть процессом, поскольку внедрение новшеств имеет своей целью получение конечного результата, лучше удовлетворяющего различные общественные потребности. Инновационный процесс же включает в себя все стадии разработки и создания нового продукта или технологии от идеи до их практического использования, а инновационная деятельность – это наиболее общее определение, которое может включать в себя несколько инновационных процессов.

Наиболее полным для предприятий ракетно-космической промышленности представляется определение инновационной деятельности как деятельности, предполагающей комплекс организационных, финансовых, научных и технологических мероприятий, направленных на поиск и разработку перспективных идей, а также внедрение и коммерциализацию результатов проведённых исследований для улучшения потребительских свойств выпускаемой продукции и технологии её изготовления, с последующим внедрением и реализацией на коммерческих рынках.

Сущность термина «инвестиция». Термин «инвестиция» происходит от латинского *invest*, что означает «вкладывать». Инновационная деятельность тесно связана с инвестициями, поскольку трансформация идеи в конечный продукт напрямую зависит от капитальных вложений. Как и в случае с инновациями, в толковании данного термина следует отметить существенные различия, до сих пор не разработано универсальное определение, которое бы удовлетворяло потребностям как теории, так и практики. Развитие рыночных отношений в России и появление работ западных авторов на русском языке повлияло на широкое распространение термина «инвестиции» в отечественной науке. Для того, чтобы сформулировать определение инвестиций в наиболее обобщённом виде, проанализируем различные отечественные и зарубежные источники (табл. 3).

Таблица 1

Первые взгляды на сущность термина «инновации»

Автор	Содержание определения
Ж. Кондорсе	Технологические новшевства, появляющиеся за счёт науки, способные ускорить её прогресс
К. Маркс	Инновации, высвобождающие основной капитал, определяются как любое усовершенствование, позволяющее расширить набор вспомогательных инструментов, сократить необходимую рабочую площадь либо продлить срок службы машин и оборудования
Д. Рикардо	Новшества, сберегающие капитал и труд, которые сокращают дозы капитала и труда, требующиеся для производства данного объема выпуска на данной площади земли, такие как «улучшения в земледельческих орудиях... экономия в использовании лошадей в сельском хозяйстве, лучшее знакомство с ветеринарным искусством»
А. Смит	Новые технологии, наиболее эффективным способом удовлетворяющие вновь возникающие потребности
Й. Шумпетер	Инновации – новые комбинации производственных факторов, мотивированные предпринимательским духом, с целью внедрения и использования новых видов товаров, новых способов и методов производства, новых источников сырья, освоения новых рынков

Таблица 2

Современный взгляд на понятие «инновации»

Автор	Содержание определения
А. Койре	Инновация – развитие идеи в новый или улучшенный продукт или производственный процесс, пользующийся спросом на рынке
П. Завлин [8]	Инновация – использование в той или иной сфере общества результатов научной деятельности, направленных на совершенствование производственных и других процессов
Н. И. Лапин [9]	Инновация – комплексный процесс, мотивированный на максимальное распространение новшества и удовлетворение через него новой или уже существующей потребности
Б. Санто	Инновация – это техническо-экономический процесс, который приводит через практическое использование идей и изобретений к созданию улучшенных технологий, вещей
Р. А. Фатхуддинов [10]	Инновация – это конечный результат внедрения новшества с целью изменения объекта управления и получения экономического, социального, экологического, научно-технического или другого вида эффекта

Таблица 3

Определение термина «инвестиции» зарубежными и отечественными авторами

Автор	Содержание определения
Дж. Кейнс	Ивестиции – это текущий прирост ценностей капитального имущества в результате производственной деятельности данного периода, часть дохода за данный период, которая не была использована для потребления
Дж. Доунс	Инвестиции – это использование капитала с целью получения дополнительных средств либо путем вложения в привлекательные инвестиционные проекты (доходные предприятия), либо с помощью участия в рискованном (венчурном) проекте, направленном на получение прибыли
А. Смит	Инвестиции – процесс накопления капитала, связанный с формированием доходов
Б. М. Данилишин, В. Г. Федоренко [11]	Инвестиции – это затраты средств, часть дохода, которая используется не на текущее потребление, а на воспроизведение всего общественного и индивидуального капитала, конечной целью которых является получение новых, более высоких доходов или социального эффекта в будущем
Я. С. Меркулов	С финансовой и экономической точек зрения инвестирование может быть определено как долгосрочное вложение экономических ресурсов с целью создания и получения чистой прибыли в будущем, превышающей общую начальную величину инвестиций
М. Ю. Маковецкий [12]	Инвестиции – это вложения сбережений всех участников экономической системы как в объекты предпринимательской и других видов деятельности, так и в ценные бумаги и иные активы с целью извлечения дохода (прибыли) или достижения положительного (социального) эффекта

Как видно, большинство авторов в качестве инвестиционных ресурсов рассматривают только денежные средства. Но капитал может инвестироваться и в других формах, например, в виде интеллектуальной собственности, оборудования, движимого и недвижимого имущества, ценных бумаг, нематериальных активов. Также не во всех определениях выделяется и результативность вложений. Результатом инвестирования может быть не только прибыль, но и, например, получение положительного социального, экологического или политического эффекта. Таким образом, учитывая указанные замечания, инвестиционная деятельность предприятий РКП – это длительный и непрерывный процесс вложения финансового, интеллектуального и другого капитала в инновационные и иные проекты, в модернизацию и обновление основных фондов с целью получения дохода либо внеэкономического эффекта в будущем, несущий в себе элемент риска.

Сущность понятия «сбалансированность». Исходя из сформулированных выше определений инновационной и инвестиционной деятельности в контексте предприятий ракетно-космической промышленности, можно перейти к формулированию концепции их сбалансированности. Для этого необходимо дать определение понятия сбалансированности и рассмотреть специфику предприятий ракетно-космической промышленности.

Игорь Ансофф ещё в 1979 г. в своей работе рассматривал понятие «сбалансированность» во время создания модели внешней среды. Модель Ансоффа имеет градацию из пяти уровней: от слабого и легкопрогнозируемого уровня к изменчивому и сложнопрогнозируемому. По его мнению, для каждого из этих уровней можно подобрать такую комбинацию стратегических элементов, при которой успех фирмы будет оптимален с позиции затраты/доход/время. Это и будет сбалансированное развитие компании. Таже, по мнению ученого, сбалансированность в контексте стратегического планирования – это обеспечение непрерывного роста и прибыльности фирмы путём улучшения сочетаемости жизненных циклов спроса и технологии. Очевидно, что И. Ансофф определяет сбалансированность как оптимальность внутрифирменных процессов, ведущих к максимизации эффективности деятельности компании.

С. А. Кузнецов в большом толковом словаре русского языка раскрывает сбалансированность следующим образом: сбалансированность – это соотношение взаимно обусловленных частей, элементов, обеспечивающее нормальное существование, функционирование, работу чего-либо.

В. М. Рябов под сбалансированностью понимает пропорциональное развитие всех структурных элементов предприятия, обеспечивающее решение поставленных перед предприятием задач [13].

Р. Каплан и Д. Нортон, разрабатывая методику сбалансированной системы показателей, определили сбалансированность как баланс между финансовыми и нефинансовыми индикаторами успеха, между внутренними и внешними компонентами организации, между запаздывающими и опережающими индикаторами [14].

Основываясь на приведённых выше определениях, можно перейти к анализу сбалансированности в контексте инновационно-инвестиционной деятельности предприятий. Как оптимальное сочетание инвестиций в разработку поэтапных, прорывных и радикальных решений на всех направлениях инновационной деятельности понимают сбалансированность Д. Макнамара, А. Лайонс и Е. Орловский [15]. Отметим, что такая позиция оправданна, поскольку сбалансированность инновационной и инвестиционной деятельности предприятия требует, во-первых, определения наиболее эффективных направлений реализации целей инвестирования при выборе объектов инновационной деятельности, а во-вторых, определения достаточного объёма требуемых инвестиционных ресурсов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сбалансированность инвестиционной и инновационной

деятельности на предприятии достигается за счёт согласования и взаимообусловленности инновационных и инвестиционных процессов, выражающихся в оптимальном выборе комбинации инновационных проектов и требуемых инвестиционных ресурсов, отвечающих возможностям и целям предприятия.

Особенности инвестиционно-инновационного процесса на предприятиях РКП. Мы рассмотрели понятие сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности. Перед тем как сформулировать сбалансированность в контексте ракетно-космической промышленности, необходимо определить специфические особенности инвестиционной и инновационной деятельности в этой отрасли.

Исторически сложилась ситуация, в которой отечественные предприятия РКП осуществляют деятельность по производству наукоёмкой и ресурсоёмкой продукции в условиях нехватки финансовых ресурсов. Во времена СССР не было необходимости быть конкурентоспособными на внутреннем рынке: предприятия полностью финансировались из государственного бюджета и работали над общими задачами и проблемами. После распада Советского Союза финансирование резко сократилось, а у РКП возникла необходимость выхода на коммерческие рынки, выдерживать конкурентную борьбу на которых она была не готова. Федеральные целевые программы финансируют конкретные проекты, редко относящиеся к коммерческим, в связи с чем предприятия РКП вынуждены разрабатывать новые технологии и изделия, а также модернизировать гражданскую продукцию за счёт прибыли, полученной от реализации освоенных НИОКР.

К специфике РКП относится и строгая зависимость от сроков реализации инновационных проектов. Это объясняется тем, что продукция производится в течение длительного срока, продукция штучная, и, как правило, её реализация имеет зависимость от графика пуска ракет-носителей. Это очень важно, поскольку просрочка в этой сфере влечет огромные убытки для заказчика, в связи с чем судебные иски к предприятиям РКП, допустившим задержку, могут достигать миллиардов рублей. Также просрочка означает серьёзные репутационные потери, что в условиях сильной конкуренции на коммерческом рынке может привести к необратимым последствиям.

На предприятиях РКП имеет место диффузия инноваций. Продукция, разработанная и произведённая по заказу Минобороны РФ, частично может перекочевать в гражданскую сферу и получить выход на коммерческий рынок. Стандартный жизненный цикл инновации на предприятии РКП выглядит следующим образом:

– возникновение идеи;
– фундаментальные и прикладные исследования;
– конструкторские работы;
– лабораторные и стендовые испытания;
– переоборудование производства;
– производство инновационной продукции;
– реализация инновационной продукции.

Во время диффузии военной разработки в гражданский сектор фактический жизненный цикл такой инновации сокращается на стадию НИОКР, поскольку нет необходимости инвестировать собственные средства предприятия в этот длительный процесс, средства направляются лишь на доработку такой продукции под гражданские нужды.

Одной из самых главных особенностей деятельности предприятий РКП является высокая длительность и высокая стоимость НИОКР в структуре жизненного цикла инновации. Наибольшая доля стоимости конечной продукции формируется именно на стадии фундаментальных и прикладных исследований, в то время как первая прибыль, полученная от созданной инновации, поступает значительно позже. Соответственно, специфичны и осуществляющиеся в данной отрасли этапы инвестиционного процесса. На предприятиях РКП несколько увеличена длительность первого этапа инвестиционного процесса (выбор вариантов вложений средств), ещё больше времени занимает второй этап (непосредственное направление инвестиционных потоков), третий этап характеризуется более короткими сроками (производство и реализация продукции). Задача менеджмента состоит в регулировании инвестиционных потоков в условиях реализации нескольких инновационных проектов для обеспечения бесперебойного финансирования как НИОКР, так и производственной стадии. Провалы в финансировании благодаря высокой непредсказуемости НИОКР могут привести к приостановке разработок на неопределённый срок.

Исходя из анализа, проведённого выше, представим инвестиционно-инновационный процесс в виде схемы (см. рисунок).

Отметим, что помимо инвестирования в инновационную деятельность предприятиям РКП также необходимо инвестировать в обновление и модернизацию основных производственных фондов, а также в обучение и повышение квалификации трудового капитала. Эти статьи затрат имеют большую долю в структуре инвестиционного портфеля, несмотря на то, что значительно меньше инвестиций в инновационные проекты.

Заключение. Целью сбалансированного развития инновационной и инвестиционной деятельности на предприятиях РКП является увеличение эффективности деятельности, выражающееся в захвате коммерческих рынков за счёт внедрения конкурентоспособной инновационной продукции и увеличения рентабельности вложений, а также в сохранении квалификации кадров и эффективном и своевременном обновлении производственных фондов. Следовательно, сбалансированностью инновационной и инвестиционной деятельности на предприятиях ракетно-космической промышленности будут являться такие согласованные и взаимообусловленные стратегии направления инвестиционных ресурсов и выбора инновационных проектов, при которых предприятие сможет достичь свои стратегические цели при условиях непрерывности инновационного процесса и бесперебойности его финансирования, что позволит предприятию РКП предлагать новые разработки и модернизированную продукцию вовремя, отвечая на требования со стороны заказчиков в более совершенной продукции.

Таким образом, создание механизма планирования сбалансированности инновационной и инвестиционной деятельности предполагает выработку такого подхода, который позволит гармонизировать цели предприятий РКП и обеспечить структурированность показателей эффективности.

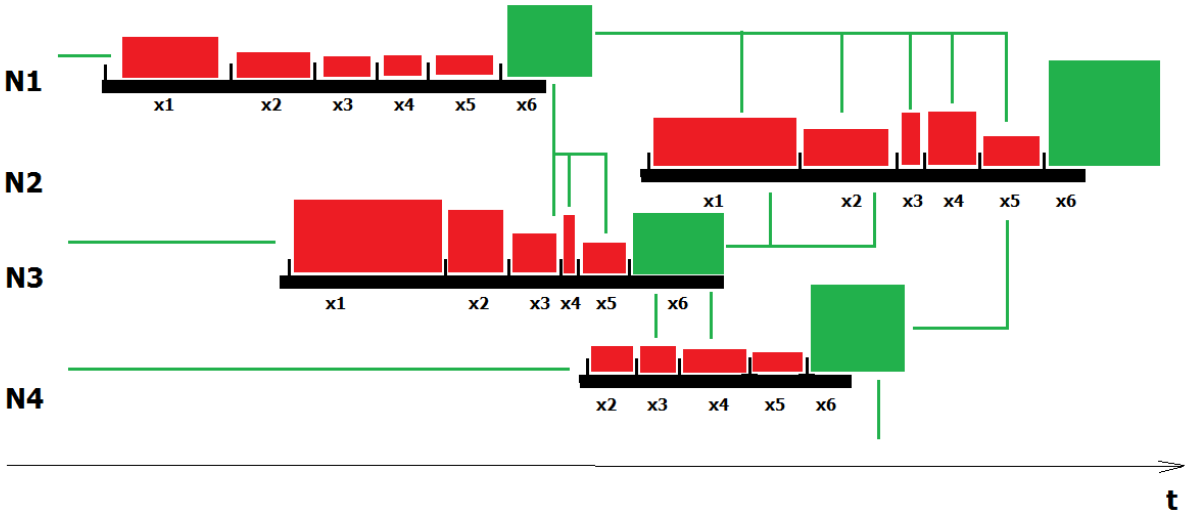


Схема инвестиционно-инновационного процесса на предприятиях РКП:
N1–N4 – инновационные проекты; x1–x6 – стадии жизненного цикла инновации; столбцы x1–x5 – необходимый объём инвестиционных ресурсов; столбцы x6 – прибыль, полученная в результате реализации инновационного продукта/услуги

Библиографические ссылки

1. Объединенная ракетно-космическая корпорация [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosorkk.ru/ (дата обращения: 02.10.2015).

2. Коммерческий космический рынок [Электронный ресурс]. URL: http://ecoruspace.me/Коммерческий%20космический%20рынок.html (дата обращения: 27.09.2015).

3. Кондорсэ Ж. А. Эскиз исторической картины прогресса человеческого разума : пер. с фр. М. : Соцэгиз, 1936. 128 с.

4. Рикардо Д. Сочинения. Т. 1. Начало политической экономии и налогообложения. М. : Госполитиздат, 1941. 288 с.

5. Маркс К., Энгельс Ф. Собрание сочинений. 2-е изд. М. : Политиздат. 1954–1981. 191 с.

6. Смит А. Исследование о природе и причинах богатства народов. М. : Соцэкгиз, 1962. 684 с.

7. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М. : Прогресс, 1982. 72 с.

8. Завлин П. Н., Казанцев А. К., Миндели Л. Э. Инновационный менеджмент : учеб. пособие. СПб. : Наука, 2005. 331 с.

9. Лапин Н. И. Теория и практика инноватики : учеб. пособие. М. : Логос, 2010. 56 с.

10. Фатхутдинов Р. А. Инновационный менеджмент : учебник для вузов по эконом. и техн. спец. СПб. : Питер, 2010. 75 с.

11. Федоренко В. Г. Инвестиционный менеджмент : учеб. пособие. Киев : Радуга, 2009. 250 с.

12. Маковецкий М. Ю. Инвестиции как ключевой фактор экономического роста // Финансы и кредит. 2007. № 2. С. 8–17.

13. Рябов В. М. Сбалансированное развитие промышленного предприятия в условиях инновационных преобразований // Вестник Самарского государственного экономического университета. Экономические науки. 2012. № 12 (98). С. 89–92.

14. Каплан Р. С., Нортон Д. П. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. М. : ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. 214 с.

15. Макнамара Д., Лайонс А., Орловский Е. Инновации в нефтегазовом секторе [Электронный ресурс]. URL: https://www.pwc.ru/ru/energy-utilities-mining/publications/assets/innovation_survey2014.pdf (дата обращения: 06.10.2015).

References

1. *Ob'edinennaya raketno-kosmicheskaya korporatsiya* [United Rocket and Space Corporation] (In Russ.). Available at: http://www.rosorkk.ru/ (accessed at 02.10.2015).

2. *Kommercheskii kosmicheskii rynok.* [The commercial space market]. Available at: http://ecoruspace.me/Kommercheskii%20kosmicheskii%20rynok.html (accessed at 27.09.2015).

3. Kondorse Zh. A. *Eskiz istoricheskoi kartiny progressa chelovecheskogo razuma* [Sketch for a Historical Picture of the Progress of the human mind]. Moscow, Sotsegiz Publ., 1936, 128 p.

4. Rikardo D. *Sochineniya. T. 1. Nachalo politicheskoi ekonomii i nalogooblozheniya* [Works. Vol. 1. Principles of Political Economy and Taxation]. Moscow, Gospolitizdat Publ., 1941, 288 p.

5. Marks K., Engels F. *Sobranie sochinenii* [Collected Works]. Moscow, Politizdat Publ., 1954–1981, 191 p.

6. Smit A. *Issledovanie o prirode i prichinakh bogatstva narodov* [The Wealth of Nations] Moscow, Sotsegiz Publ., 1962, 684 p.

7. Shumpeter I. *Teoriya ekonomicheskogo razvitiya* [Theory of Economic Development]. Moscow, Progress Publ., 1982, 72 p.

8. Zavlin P. N., Kazantsev A. K., Mindeli L. E. *Innovatsionnyi menedzhment* [Innovation management]. St. Pererburge, Nauka Publ., 2005, 331 p.

9. Lapin N. I. *Teoriya i praktika innovatiki* [Theory and practice of innovation] Moscow, Logos Publ., 2010, 56 p.

10. Fatkhutdinov R. A. *Innovatsionnyi menedzhment: uchebnik dlya vuzov po ekonomicheskim i tekhnicheskim spetsial'nostyam* [Innovation Management: a textbook for high schools on economic and technical specialties]. St. Pererburge, Piter Publ., 2010, 75 p.

11. Fedorenko V. G. *Investitsionnyi menedzhment* [Investment management]. Kiev, Raduga Publ., 2009, 250 p.

12. Makovetskii M. Yu. [Investments as a key factor of economic growth]. *Finances and Credit*, 2007, No. 2, P. 8–17 (In Russ.).

13. Ryabov V. M. [Balanced development of industrial enterprise in terms of innovation] *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki*. 2012, No. 12(98), P. 89–92 (In Russ.).

14. Kaplan P. C., Norton D. P. *Sbalansirovannaya sistema pokazatelei. Ot strategii k deistviyu* [Balanced Scorecard. From strategy to action]. Moscow, Business-Olympus Publ., 2003, 214 p.

15. Maknamara D., Laions A., Orlovskii E. *Innovatsii v neftegazovom sektore.* [Innovation in the oil and gas sector] (In Russ.). Available at: https://www.pwc.ru/ru/energy-utilities-mining/publications/assets/innovation_survey2014.pdf (accessed at 06.10.2015).

© Сердюк Р. С., Ерыгина Л. В.,2015

УДК 65.011

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1067–1070

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р. В. Смородинов, Н. И. Смородинова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: rs105826@gmail.com

Проведен анализ определения понятия инновационной деятельности, предлагаемый отечественными и зарубежными авторами. Для предприятия ракетно-космической промышленности инновационная деятельность может быть рассмотрена как процесс, направленный на воплощение результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений в новый или усовершенствованный продукт, реализуемый на рынке, либо в новый или усовершенствованный технологический процесс, используемый в практической деятельности. Данная деятельность многообразна, включает в себя маркетинговые исследования рынка, оценку конкурентоспособности новых продуктов или технологий, их потребительских свойств, распространение и тиражирование новых изделий и технологий, методов организации производства. Поэтому инновационная деятельность предприятия не может быть оценена несколькими показателями, которые указаны в действующих методиках.

Предложено определение эффективности инновационной деятельности предприятия ракетно-космической промышленности с помощью системы показателей. Для этого рассчитываются показатели народнохозяйственной эффективности, производственной эффективности, финансовой эффективности, а также социальной эффективности. Указаны показатели, характеризующие каждый вид эффективности. Такая система показателей позволит учесть, что в осуществлении инновационной деятельности занято большое количество персонала не только самого предприятия, но и сотрудников проектных, конструкторских и исследовательских организаций, а также тот факт, что создание, производство и эксплуатация новых видов продукции и технологий проводится в течение достаточно длительного периода времени.

Ключевые слова: инновации, инновационная деятельность, показатели эффективности, оценка эффективности, ракетно-космическая промышленность.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1067–1070

EVALUATION OF INNOVATIVE ACTIVITY OF THE AEROSPACE INDUSTRY ENTERPRISE

R. V. Smorodinov, N. I. Smorodinova

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: rs105826@gmail.com

The authors analyzed the determination of the concept of innovation activities offered by domestic and foreign authors. Innovative activity in enterprises of space-rocket industry can be considered as a process designed to the embodiment of the results of scientific research and development or other scientific and technological achievements into a new or improved product, sold on the market or a new or improved technological process used in practice activities. This activity is diverse, includes market research, evaluation of the competitiveness of new products or technologies, their consumer properties, distribution and circulation of new products and technologies, methods of organization of production. Therefore, the innovative activity of the enterprise can not be measured by several indicators, specified in the operating methodologies.

The authors proposed to determine the effectiveness of the innovation activity of the aerospace industry enterprise through a system of indicators. The methodology offers to count economic efficiency indicators, production efficiency, financial efficiency and social efficiency. Indicators describing each type of efficiency are listed. This system of indicators allows to take into account that in the implementation of innovation activities employs a large number of staff, not only the company itself, but also employees of design, engineering and research organizations, and that the creation, production and exploitation of new products and technologies is carried out over a fairly long period of time.

Keywords: innovation, innovation activity, performance indicators, performance evaluation, aerospace industry.

Введение. В настоящее время внедрение новых изделий и технологий в деятельность предприятия невозможно без использования обоснованной методики оценки эффективности инновационной деятельности. Особенно важным этот вопрос является для предприятий ракетно-космической промышленности с целью обеспечения устойчивости их работы в современных условиях, усиления конкурентных преимуществ и активизации инновационной деятельности.

Для решения данной проблемы необходимо сформировать систему методов экономического, инвестиционного анализа, определить, с помощью системы каких показателей возможна такая оценка. Отсутствие методики оценки эффективности может привести к тому, что предприятие может отказаться от внедрения инноваций из-за невозможности определения конечных экономических и финансовых результатов.

Инновационная деятельность предприятия: сущность, понятие, содержание. В современной литературе рассматривается и анализируется содержание понятий «инновация» и «инновационная деятельность предприятия». Инновации в ракетно-космической промышленности – это новые продукты или услуги, наукоемкие технологические процессы. Саму инновацию можно рассматривать как внедренное новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности процессов или продукции, востребованное рынком, она является конечным результатом интеллектуальной деятельности человека, его фантазии, творческого процесса, открытий, изобретений и рационализации [1].

В настоящее время отечественными и зарубежными авторами предложены различные определения понятия инновационной деятельности предприятия (см. таблицу).

Наиболее точным, с нашей точки зрения, для предприятия ракетно-космической промышленности является следующее определение. *Инновационная деятельность* – это процесс, направленный на воплощение результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений в новый или усовершенствованный продукт, реализуемый на рынке, либо в новый или усовершенствованный технологический процесс, используемый в практической деятельности [12].

Определение содержания понятия «инновационная деятельность»

Автор	Определение
Питер Ф. Друкер [2]	Инновационная деятельность – это особый инструмент, позволяющий предпринимателю использовать перемены и превращать их в новые возможности, например, для открытия нового бизнеса или оказания новой услуги. Все это можно представить как отдельную отрасль знаний, этому можно научиться, а затем использовать в своей практической деятельности
К. Кристенсен, М. Рейнор [3; 4]	Инновационная деятельность предприятия – это деятельность, направленная на использование результатов научных исследований и разработок для обновления номенклатуры и улучшения качества выпускаемой продукции, совершенствования технологии ее изготовления
В. П. Баранчеев, Н. П. Масленникова, В. М. Мишин [5]	Инновационная деятельность – это трансформация и использование новшества – работа над нововведением
Г. П. Беляков, С. В. Еремеева [6]	Инновационная деятельность должна быть направлена на освоение новых рынков и ресурсосберегающих технологий производства продукции, ее эффективность определяется привлекательностью тех отраслей, в которых будут создаваться нововведения, а также способностью инновационной инфраструктуры обеспечивать эффективную коммерциализацию результатов научно-технической деятельности
Приказ Росстата от 19.08.2011 г. № 367 [7]	Инновационная деятельность – вид деятельности, связанный с трансформацией идей (обычно результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений) в технологически новые или усовершенствованные продукты или услуги, внедренные на рынке, в новые или усовершенствованные технологические процессы или способы производства (передачи) услуг, использованные в практической деятельности
А. А. Трифилова [8]	Инновационную деятельность принято характеризовать как процесс, направленный на воплощение результатов научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений в новый или усовершенствованный продукт, реализуемый на рынке, в новый или усовершенствованный технологический процесс, используемый в практической деятельности
И. Л. Туккель, С. А. Голубев, А. В. Сурина [9]	Инновационная деятельность предприятия представляет существенную часть разработки стратегических направлений деятельности предприятия, позволяющих использовать технологические инновации с учетом целей и задач устойчивого развития предприятия
Л. В. Ерыгина, Р. С. Сердюк [10; 11]	Инновационная деятельность – совокупность трудовых действий, ведущих к созданию, использованию и распространению характеризующихся научно-технической новизной технологий

Инновационная деятельность помимо разработки и освоения инноваций включает в себя также маркетинговые исследования рынка, оценку конкурентоспособности новых продуктов или технологий, их потребительских свойств, изучение возможности развития сферы услуг и т. д. [13]. Важным условием осуществления инновационной деятельности является распространение и тиражирование новых изделий и технологий, методов организации производства. Для этого необходимо создание определенной инновационной среды, олицетворением которой является компетентный и квалифицированный производственный персонал.

Система показателей оценки эффективности инновационной деятельности предприятия. Предлагаемые методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов от 21.06.1999 № ВК 477 показатели эффективности не совсем подходят для использования их в отношении инновационной деятельности [14]. Используемые в ней методы основываются на коммерческих показателях эффективности и не определяют, как будут изменяться результативные экономические и финансовые показатели деятельности предприятия.

Оценка эффективности инновационной деятельности должна проводиться с помощью целой системы показателей. При этом должна учитываться ее народно-хозяйственная эффективность с показателями роста валового дохода, снижения издержек, экономии капитальных вложений [15], производственная эффективность с показателями повышения технического уровня изделий, повышения производительности и надежности технических систем, финансовая эффективность с показателями изменения чистого дохода, прибыли, рентабельности продукции, инвестиционная эффективность с показателями экономического эффекта, срока окупаемости капитальных вложений, рентабельности капитальных вложений. Кроме этого, необходимо определять социальную эффективность с учетом роста доходов населения, снижения уровня безработицы и экологическую, представляющую улучшение качества окружающей среды, снижение количества вредных выбросов в атмосферу и т. д.

Рассмотренная система показателей позволит учесть тот факт, что при осуществлении инновационной деятельности занято большое количество разнообразного персонала не только самого предприятия, но и сотрудников проектных, конструкторских и исследовательских организаций, а также то, что создание, производство и эксплуатация новых видов продукции и технологий проводится в течение достаточно длительного периода времени, важной целью такой деятельности является достижение более высоких результатов по сравнению с аналогами.

Заключение. Таким образом, в отечественной и зарубежной практике проведено много исследований, но ряд теоретических вопросов, учитывающих особенности предприятий, требует теоретической проработки или усовершенствования для их экономического развития в условиях конкуренции и необходимости расширения внедрения инноваций. Для продвижения инноваций на рынок и возможности определения экономических результатов их внедрения необходима оценка их эффективности с помощью системы показателей, определяющих их народнохозяйственную, производственную, финансовую, инвестиционную и социальную эффективность.

Библиографические ссылки

1. Инновация [Электронный ресурс] // Википедия. 2015. URL: http://ru.wikipedia.org (дата обращения: 08.09.2015).

2. Питер Ф. Друкер. Бизнес и инновации. М. : Вильямс, 2009. 423 с.

3. Christensen C. M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail Boston : Harvard Business School Press, 1997. P. 179.

4. Кристенсен К., Рейнор М. Решение проблемы инноваций в бизнесе. Как создать растущий бизнес и успешно поддерживать его рост. М. : Альпина Паблишер, 2014. 290 с.

5. Баранчеев В. П., Масленникова Н. П., Мишин В. М. Управление инновациями : учебник. М. : Юрайт, 2014. 711 с.

6. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Понятие и сущность инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности // Теория и практика общественного развития. 2013. № 11. С. 474–477.

7. Об утверждении статистического инструментария для организации федерального статистического наблюдения за численностью, оплатой труда работников и наукой : приказ Федеральной службы госстатистики [Электронный ресурс] // Электрон. фонд правовой и нормативно-технической документации. 2012. URL: http://docs.cntd.ru/document/902298676 (дата обращения: 28.09.2015).

8. Трифилова А. А. Управление инновационным развитием предприятия. М. : Финансы и статистика, 2003. 176 с.

9. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий / И. Л. Туккель [и др.]. СПб. : БХВ-Петербург, 2013. 208 с.

10. Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Инновационный процесс на предприятиях оборонно-промышленного комплекса // Проблемы современной экономики. 2014. № 22–2. С. 134–138.

11. Ерыгина Л. В. Методика выбора стратегии развития технологической инновации на предприятиях ракетно-космической промышленности // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 1. С. 122–127.

12. Яшин С. Н., Кошелев Е. В., Макаров С. А. Анализ эффективности инновационной деятельности : учеб. пособие. СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 288 с.

13. Минько Э. В., Завьялов О. А., Минько А. Э. Оценка эффективности коммерческих проектов : учеб. пособие. СПб. : Питер, 2014. 368 с.

14. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов от 21.06.1999 № ВК 477.

15. Экономика и финансовое обеспечение инновационной деятельности : учеб. пособие / И. Л. Туккель [и др.]. СПб. : БВХ-Петербург, 2011. 240 с.

References

1. *Innovatsiya* [Innovation]. Available at: http://ru.wikipedia.org (accessed 08.09.2015).

2. Piter F. Druker. *Biznes i innovatsii* [Business and Innovation]. Moscow, Wilyams Publ., 2009, 423 p.

3. Christensen C. M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail / C. M. Christensen. Boston : Harvard Business School Press, 1997, P. 179.

4. Christensen C., Reinor M. *Reshenie problem innovatsii v biznese. Kak sozdat' rastushii biznes i uspeshno podderchivat' ego rost* [The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth]. Moscow, Alpina Pablisher Publ., 2014, 290 p.

5. Barancheev V. P., Maslennikova N. P., Mishin V. M. *Upravlenie innovatsiyami* [Innovation Management]. Moscow, Yurait Publ., 2014, 711 p.

6. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. [The concept and essence of innovation potential of science enterprises in rocket space industry]. *Teoriya i praktika obchestvennogo razvitiya.* 2013, No. 11, P. 474–477.

7. [On approval of statistical tools for the organization of federal statistical observation of numbers, compensation of employees and science]. *Elektron. Fond pravovoi i normativno-tekhnicheskoi dokumentatsii.* [Electronic fund the legal, regulatory and technical documentation]. Available at: http:// docs.cntd.ru/ document/902298676 (accessed 28.09.2015).

8. Trifilova A. A. *Upravlenie innovatsionnim razvitiem predpriyatiya* [Innovative development management in the enterprise]. Moscow, Finansi i kredit Publ., 2003, 176 p.

9. Tukkel' I. L., Golubev S. A., Surina A. V. *Metody i instrumenyi upravleniya innovatsionnym razvitiem promishlennogo predpriyatiya* [Methods and indicators for managing innovative development of industrial enterprises]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2013, 208 p.

10. Erigina L. V., Serdyuk R. S. [Innovative processes in the defense industry]. *Problemy sovremennoi ekonomiki.* 2014, No. 22-2, P. 134–138 (In Russ.).

11. Erigina L. V. [Methods of choosing strategy of technological innovation in the enterprises of aerospace industry]. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatsii.* 2008, No. 1, P. 122–127 (In Russ.).

12. Yashin S. N., Koshelev E. V., Makarov S. A. *Analiz effektivnosti innovatsionnoy deyatel'nosti* [Efficiency Analysis of innovation activity]. St. Petersburg, BHV-Petesrburg Publ., 2012, 288 p.

13. Min'ko E. V., Zav'yalov O. A., Min'ko A. E. *Otsenka effektivnosti kommercheskikh proektov* [Evaluation of commercial projects]. St. Petersburg, Piter Publ., 2014, 368 p.

14. Guidelines for the evaluation of investment projects. 21.06.1999 No. VK 477 (In Russ.).

15. Tukkel' I. L., Yashin S. N., Koshelev E. V. *Ekonomika i finansovoe obespechenie innovatsionnoy deyatel'nosti* [Economics and financial support of of innovation activity]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011, 240 p.

© Смородинов Р. В., Смородинова Н. И., 2015

УДК 377

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1071–1077

РОЛЬ ДУАЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ИННОВАЦИОННОМ РАЗВИТИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. И. Таюрский[1], В. А. Левко[2*]

[1]Институт проблем непрерывного образования Российской академии образования
Российская Федерация, 660021, г. Красноярск, Казарменный пер., 8
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[*]E-male: levko@sibsau.ru

Описана проблема нехватки квалифицированных рабочих кадров в России. Рассмотрены основные причины возникновения этой проблемы. Приведен пример подготовки рабочих кадров в Германии на основе дуального обучения. Дана краткая характеристика проекта Агентства стратегических инициатив по подготовке рабочих кадров, соответствующих требованиям высокотехнологичных отраслей промышленности, на основе дуального образования. Описаны распоряжения Правительства Российской Федерации по комплексу мер, направленных на совершенствование системы среднего профессионального образования, а также по обеспечению повышения производительности труда, созданию и модернизации высокопроизводительных рабочих мест. Отмечено, что без государственной поддержки модернизация системы среднего профессионального образования невозможна. Помимо государственной поддержки развития системы среднего профессионального образования необходима консолидация ресурсов бизнеса, государства и сферы образования. Приведены предложения по изменению законодательства Российской Федерации, направленному на мотивацию предприятий к участию в практико-ориентированной (дуальной) модели подготовки высококвалифицированных рабочих кадров. Дана оценка участия предприятий и вузов Красноярского края в проекте по дуальному образованию. Рассмотрено воздействие дуального профессионального образования при подготовке высококвалифицированных кадров на инновационное развитие промышленного предприятия. Отмечено, что реализация проекта по переходу системы профессионального образования в регионах России на практико-ориентированное (дуальное) обучение позволит сформировать на инновационных предприятиях такое кадровое обеспечение, которое позволит обеспечить повышение производительности труда, а также будет способствовать ускорению снизу процесса создания и модернизации высокопроизводительных рабочих мест. При этом предприятия могут воспользоваться не только государственной системой подготовки кадров, но и получить государственную поддержку по компенсации собственных затрат.

Ключевые слова: дуальное образование, система профессионального образования, инновационное развитие, производительность труда, государственная поддержка, консолидация ресурсов.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1071–1077

THE ROLE OF DUALLY PROFESSIONAL EDUCATION FOR INNOVATIVE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

A. I. Tayurskii[1], V. A. Levko[2*]

[1]Institute of problems of continuous education of Russian Academy of Education
8, Kazarmenny lane, Krasnoyarsk, 660021, Russian Federation
[2]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[*]E-mail levko@sibsau.ru

In the proposed article the authors described the problem of shortage of skilled workers in Russia. They considered the main causes of this problem. They described an example of preparation of personnel in Germany on the basis of the dual training. The authors present brief description of the project of the Agency for Strategic Initiatives for training workers, meet the requirements of high-tech industries, based on the dual education. They described in order of the Government of the Russian Federation on a range of measures aimed at improving the system of vocational education, as well as providing increased productivity, creation and modernization of high-performance workstations. The article noted that without government support the modernization of the system of secondary vocational education is

impossible. In addition to state support of development of secondary vocational education it is necessary to consolidate the resources of business, government and education. The authors listed proposals to change the legislation of the Russian Federation aimed at motivating companies to participate in the practice-oriented (dual) model, the training of highly skilled workers. They assessed the participation of companies and universities of the Krasnoyarsk Territory in the project for dual education. They examined the effects of the dual vocational training in the preparation of highly qualified personnel in the innovative development of industrial enterprises. The article noted that the project on the transition system of vocational education in the regions of Russia on the practice-oriented (dual) training will form on innovative enterprises is staffing, which will ensure increased productivity, and will contribute to the acceleration of the bottom of the process of creation and modernization of high-performance work places. At the same time, enterprises can take advantage of not only the state system of training, but also to get government support to offset their own costs.

Keywords: dual education, vocational education, innovative development, work performance, government support, consolidation of resources.

Введение. Сегодня в системе российского профобразования обучаются 3,5 млн учащихся, а в высших учебных заведениях – 7,5 млн студентов. Парадокс ситуации состоит в том, что спрос на выпускников колледжей и училищ выше, чем выпускников вузов. Именно отсутствие рабочих кадров, по мнению экономистов, сдерживает развитие целых отраслей и регионов [1].

Многие как российские, так и зарубежные компании год от года все острее ощущают нехватку в России хорошо подготовленных профессиональных кадров. Согласно аналитическим исследованиям, проведенным Российско-Германской внешнеторговой палатой в Российской Федерации [2], система профессионального образования не отвечает актуальным экономическим и социальным требованиям страны, а немецкие предприятия считают недостаток квалифицированных кадров главным препятствием для их дальнейшего развития в России. Наблюдаемый сегодня демографический тренд может привести к тому, что на протяжении ближайших десяти лет численность рабочей силы, доступной на рынке труда, сократится на 10 млн человек.

Возросшая потребность в хорошо обученных специалистах обусловлена стремительным экономическим ростом последнего десятилетия. Кроме того, возникшая проблема объясняется среди прочего недостаточно функционирующей системой профессионального образования. Это проявляется, прежде всего, в следующем:

– система профессионального образования недофинансирована и не ориентирована на потребности малого и среднего бизнеса;

– лишь 50 % преподавательских кадров имеют достаточную квалификацию;

– торгово-промышленные палаты и объединения предпринимателей недостаточно вовлечены в процесс формирования системы профессионального образования.

В отличие от этого в Германии, где действует принцип дуального профессионального образования, делается ставка на привлечение частного бизнеса, который ежегодно инвестирует свыше 23 млрд евро в подготовку специалистов нужного профиля и после окончания периода обучения получает выгоды от высокого качества подготовленных кадров.

Эксперты Агентства стратегических инициатив (АСИ) выделяют четыре ключевых проблемы отсутствия рабочих кадров требуемой квалификации [3]:

– производительность труда по рабочим профессиям в России существенно ниже, чем в наиболее развитых странах мира (по ряду отраслей производительность труда в России составляет 15–25 % от уровня США);

– несмотря на достаточно высокий уровень образования, российские рабочие не обладают практическими навыками, необходимыми для того, чтобы отечественные предприятия могли конкурировать на мировом рынке;

– при этом качество среднего профессионального образования продолжает ухудшаться, отсутствует эффективное профессиональное обучение;

– инвесторы не готовы приходить в регионы, в которых отсутствует рабочая сила необходимого уровня подготовки и квалификации.

Другой стороной проблемы является существенный моральный износ рабочих мест основного персонала как крупных предприятий промышленности, так и транспорта и связи.

Для того, чтобы рабочие места на промышленных предприятиях соответствовали требованиям мировых прогрессивных производственных технологий, необходимо не только стимулирование технологического обновления предприятий, но и подготовка рабочих кадров, способных работать на современном высокопроизводительном оборудовании.

В 2014 году в России АСИ провело конкурс по реализации проекта «Подготовка рабочих кадров, соответствующих требованиям высокотехнологичных отраслей промышленности, на основе дуального образования», в котором приняли участие 23 субъекта РФ. Министерство образования и науки гарантировало, что все участвующие в проекте образовательные учреждения получат статус федеральных инновационных площадок. Минпромторг и Минтруд также выразили готовность поддерживать те компании, которые будут участвовать в программе дуального образования [4].

Победителями конкурса и участниками проекта стали десять субъектов Российской Федерации: Республика Татарстан, Красноярский и Пермский края, а также Волгоградская, Калужская, Московская, Нижегородская, Свердловская, Ульяновская, Ярославская области. В реализации проекта принимают участие десятки предприятий и учебных заведений [5].

Разработчики проекта ожидают следующие эффекты от его реализации [3]:

– повышение инвестиционной привлекательности регионов России за счет подготовки рабочих кадров, соответствующих требованиям высокотехнологичных отраслей промышленности, на основе дуального образования;

– перераспределение финансирования корпоративных программ переподготовки кадров в пользу системы государственного образования (подготовки) кадров;

– значительный рост квалификации рабочих кадров и повышение престижа рабочих профессий в результате развития новых форм образования.

Программа также предусматривает участие предприятия в финансировании подготовки кадров и сетевое взаимодействие учебного заведения и работодателя.

Все это требует конструктивного анализа и эффективного использования лучшего не только отечественного, но и зарубежного опыта. На концептуальном уровне это возможно осуществить посредством сравнительной педагогики, теоретического исследования фундаментальных основ, особенно российской профессиональной школы и промышленных предприятий.

Дуальная форма образования. Уверенное поведение на рынке труда позволило обратиться к дуальному обучению. Такая система подготовки кадров, особенно рабочих, давно работает в Германии, Швейцарии, где действует Международный институт мониторинга качества рабочей силы. С научной точки зрения из всей типологии системы профессионального образования ФРГ особенно актуальным представляется исследование системы дуального обучения рабочих кадров. Её истоки берут начало в системе ученичества, которое было распространено в арабских, азиатских, европейских странах мира в самые ранние исторические эпохи, но в процессе развития приобрело в Германии национальные особенности. Сформировавшаяся позднее, особенно под влиянием реформаторского движения в европейской педагогике на рубеже XIX–XX веков, возглавляемого немецким педагогом-исследователем Георгом Кершенштейнером, концепция дуальной формы профессионального образования была законодательно принята в довоенной Германии как основной метод подготовки и воспитания молодых рабочих.

Дуальная форма профессионального образования, как пишет в своей докторской диссертации Г. А. Федотова, характеризуется как образовательный процесс, сочетающий практическое обучение с частичной занятостью на производстве и обучение в традиционном образовательном учреждении [6].

Дуальная форма профессионального образования рассматривается не только как педагогическая альтернатива, но и как успешно адаптированный к условиям рыночной экономики образовательный феномен, оказавший как прямое, так и опосредованное влияние на развитие профессиональной педагогики различных стран, включая Россию. Ее возникновение ознаменовало смену традиций, когда взамен рационалистической средневековой прусской традиции профессиональной подготовки мастером отдельного и «себе подобного» ученика, экономика востребовала новую форму подготовки квалифицированных работников на основе тесного взаимодействия предприятий и профессиональных школ.

Проведенный анализ научных публикаций по исследуемой проблеме за последние 20 лет позволяет утверждать, что ни одна национальная образовательная модель не привлекла такого пристального внимания ученых, специалистов и педагогов, как дуальная форма профессионального образования, и прежде всего в Германии. Большинство исследователей признают невозможность ее прямого копирования, но одновременно сходятся в том, что анализ дуальной формы создает предпосылки внедрения наиболее эффективных ее элементов в системы профессионального образования стран с рыночной экономикой.

Анализ концепции дуальной формы профессионального образования предполагает анализ и структурирование совокупности ее ведущих идей. Определяющей среди них является тесная зависимость системы профессионального образования от рынка труда и работодателей, ее функционирование на основе социального партнерства.

В то же время, несмотря на общемировую известность дуальной формы профессионального обучения, до настоящего времени в РФ отсутствуют ее фундаментальные исследования, а авторы научных трудов по этой проблеме ограничиваются анализом лишь ее отдельных аспектов.

Высокая жизнеспособность и надежность дуальной системы, видимо, объясняется тем, что она отвечает кровным интересам всех участвующих в ней сторон – предприятий, работников, государства. Для предприятия дуальное образование – это возможность подготовить для себя кадры точно «под заказ», обеспечив их максимальное соответствие всем своим требованиям, экономя на расходах на поиске и подборе работников, их переучивании и адаптации. К тому же есть возможность отобрать самых лучших учеников, ведь за три года все их сильные и слабые стороны становятся очевидными. В свою очередь, такой подход мотивирует учащихся учиться не для галочки [7].

Новички могут сразу работать с полной отдачей и производительностью, они хорошо знают жизнь предприятия и чувствуют себя на нем «своими». Все это в совокупности способствует закреплению кадров и уменьшению текучести, что для производства немаловажно.

Участие в подготовке кадров положительно сказывается на репутации предприятия и его имидже как работодателя на рынке труда (так называемом HR-бренде компании). При этом за ним остается право выбора, и оно само решает, организовывать ли у себя обучение. Для мелких предприятий, желающих проводить обучение, но не имеющих возможности оборудовать собственные мастерские, торгово-промышленные палаты создают межпроизводственные учебные центры [7].

Так пермский опыт, с которым губернатор края Виктор Басаргин ознакомил главу государства В. Путина, был одобрен Президентом России [8].

Несмотря на хорошие результаты дуального обучения, оно внедряется очень медленно. Главная причина – отставание образовательных стандартов, которые

ориентированы на значительное превышение теоретического обучения над производственным, которое составляет примерно 65–70 % над 30–35 %. При данной ситуации о качестве производственного обучения говорить не приходится.

Внедрение дуального обучения потребует не только разработки образовательных стандартов, но и в целом комплексного подхода к качественной подготовке кадров. Один из важнейших элементов – это повышение квалификации не только преподавателей, но и мастеров производственного обучения, руководителей учебных заведений среднего профессионального образования. Необходимо изыскать финансовые ресурсы для их зарубежной стажировки, так как российская система профессионального образования существенно отстает от европейской. Российский участник «конкурса мастеров», проходившего в 2013 году в Лейпциге, рассказывал, что российские каменщики по старинке колют кирпич топором, в то время как европейские мастера режут его лазером [9].

Таким образом, в рамках дуального образования должны быть улучшены условия для участия предприятий. Предприятие, в частности, несет значительные расходы на подготовку и квалификацию инструкторского состава, выплачивает денежные вознаграждения, а также создает материально-технические условия для мест обучения (лаборатория, мастерская и т. д.). В отличие от расходов на курсы повышения квалификации для сотрудников предприятий, расходы на дуальное профессиональное образование не облагаются налогами, они оплачиваются из чистой прибыли предприятия.

Нормативное и правовое обеспечение. Правительство Российской Федерации в последние годы уделяет большое внимание не только повышению производительности труда, созданию и модернизации высокопроизводительных рабочих мест, но и популяризации рабочих и инженерных профессий, а также совершенствованию системы среднего профессионального образования.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 09 июля 2014 г. № 1250-р утвержден план мероприятий по обеспечению повышения производительности труда, созданию и модернизации высокопроизводительных рабочих мест [10]. В нем задаются рамки и этапы создания государственной программы Российской Федерации, согласно которой динамика производительности труда в авиационной промышленности в период с 2014 по 2020 гг. должна иметь ежегодный прирост в 14–15 %.

В этом же распоряжении расписаны мероприятия по шести основным направлениям. В стимулировании инвестиций для обновления и модернизации производства упрощена процедура отбора инвестиционных проектов и порядка предоставления государственных гарантий при их реализации. Создан механизм проектного финансирования с обеспечением конечной процентной ставки для заемщика не выше уровня ставки рефинансирования Банка России плюс 1 % годовых.

Для стимулирования технологического обновления в июле 2014 принят федеральный закон в части совершенствования нормирования в области охраны окружающей среды и введения мер экономического стимулирования хозяйствующих субъектов для внедрения наилучших доступных технологий. Утвержден график поэтапного принятия отраслевых справочников наилучших доступных технологий. Приказом Минпромторга в марте 2015 года осуществлена увязка предоставляемых мер поддержки промышленных предприятий с требованиями по внедрению прогрессивных производственных технологий [11].

Для стимулирования замены устаревших рабочих мест в декабре 2014 года внесены изменения в законодательные акты Российской Федерации, определяющие понятие специальной оценки рабочего места основного персонала крупных предприятий промышленности, транспорта и связи. В декабре 2014 принято решение о проведении в 2015–2016 годах специальной оценки рабочих мест основного персонала крупных предприятий промышленности, транспорта и связи. В июне 2015 года утверждена методика специальной оценки рабочего места основного персонала, и до декабря 2016 года планируется проведение специальной оценки этих мест. Принято решение по проведению в 2015 году переоценки в бухгалтерском учете крупных и средних предприятий промышленности, транспорта и связи отдельных категорий основных фондов (оборудования) с истекшим сроком полезного использования.

До июля 2017 года планируется создать механизмы стимулирования замены устаревших рабочих мест по итогам специальной оценки рабочих мест. Подготовлены предложения по внесению изменений в Налоговый кодекс Российской Федерации, предусматривающих повышение уровня налогообложения организаций, имеющих основные фонды (оборудование) с истекшим сроком полезного использования.

Для создания условий для профессионального развития работников разработан и должен ежегодно актуализироваться национальный классификатор (перечень) видов профессиональной деятельности с учетом их востребованности на рынке труда. Установлены целевые показатели по утверждению профессиональных стандартов, а также по разработке и актуализации федеральных государственных образовательных стандартов профессионального образования. Намечено проведение профессионально-общественной аккредитации профессиональных образовательных программ.

В части нормативно-правового обеспечения профессионального развития работников планируется разработка и принятие федерального закона о системе независимой сертификации квалификаций с созданием отраслевых советов по профессиональным квалификациям, независимых центров сертификации квалификаций, которые будут наделены полномочиями, отраслевыми советами по профессиональным квалификациям. Этот закон предусматривает подтверждение квалификации работников и специалистов в независимых центрах сертификации квалификаций.

Также предусмотрено внесение изменений в налоговое законодательство Российской Федерации, направленных на мотивацию предприятий к участию в практико-ориентированной (дуальной) модели

подготовки высококвалифицированных рабочих кадров. Намечены основные меры по повышению мобильности трудовых ресурсов.

Меры по повышению производительности труда в компаниях с государственным участием предусматривают организацию федерального статистического наблюдения показателей, характеризующих производительность труда по крупным и средним предприятиям сектора нефинансовых корпораций с государственным участием. Эти показатели будут включены в систему ключевых показателей эффективности руководителей акционерных обществ, в которых Российская Федерация владеет более 50 % акций, а также федеральных государственных унитарных предприятий.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 05 марта 2015 г. № 366-р утвержден план мероприятий, направленных на популяризацию рабочих и инженерных профессий [12]. В нем предусмотрено ежегодное проведение всероссийской олимпиады профессионального мастерства обучающихся по профессиям и специальностям среднего профессионального образования, а также продолжение ежегодного Всероссийского конкурса профессионального мастерства «Лучший по профессии» в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации «О Всероссийском конкурсе профессионального мастерства «Лучший по профессии» [13].

Особое внимание уделяется проведению Национального чемпионата сквозных рабочих профессий высокотехнологичных отраслей по методике WorldSkills с учетом мероприятий JuniorSkills, а также отраслевых чемпионатов России. Для успешного участия в мировых чемпионатах рабочих профессий планируется организация и проведение всероссийского тренировочного лагеря кандидатов в национальную сборную Международного чемпионата WorldSkills International.

В этом постановлении Росмолодежи поручено содействие в проведении международного конкурса среди организаций на лучшую систему работы с молодежью на предприятиях.

Распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.03.2015 № 349-р утверждает комплекс мер, направленных на совершенствование системы среднего профессионального образования, на 2015–2020 годы [14]. В этом распоряжении первоочередное внимание уделено обеспечению соответствия квалификации выпускников требованиям современной экономики.

Для этого ведется работа по подготовке списка перспективных и востребованных на рынке труда профессий и специальностей, требующих среднего профессионального образования, с выделением 50 наиболее перспективных и востребованных профессий и специальностей. Для этих профессий и специальностей планируется разработка и актуализация профессиональных стандартов, в том числе в соответствии с лучшими зарубежными стандартами и передовыми технологиями.

Список из 50 наиболее перспективных профессий должен быть одобрен Национальным советом при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям во второй половине 2015 года. Далее должны быть актуализированы профессиональные стандарты, а затем с учетом требований профессиональных стандартов актуализированы и утверждены федеральные государственные образовательные стандарты среднего профессионального образования по 50 наиболее перспективным и востребованным профессиям и специальностям. Завершающим этапом методической проработки должно стать включение в реестр примерных основных образовательных программ примерных образовательных программ среднего профессионального образования.

Обязательным условием является последовательное внедрение в среднем профессиональном образовании практико-ориентированной (дуальной) модели обучения в период с 2016 по 2020 гг.

Для этого должна быть созданы и апробированы модели подготовки педагогических кадров для системы среднего профессионального образования в организациях высшего образования, профессиональных образовательных организациях и организациях дополнительного профессионального образования.

Предусмотрена организация дополнительного профессионального образования руководителей профессиональных образовательных организаций, осуществляющих подготовку кадров по 50 наиболее перспективным и востребованным профессиям и специальностям.

По результатам проведения чемпионатов профессионального мастерства, всероссийских олимпиад и конкурсов по перспективным и востребованным профессиям и специальностям, в том числе национального чемпионата «Ворлдскиллс Россия», Всероссийского конкурса профессионального мастерства «Лучший по профессии», должны быть подготовлены методические рекомендации по совершенствованию среднего профессионального образования.

Без государственной поддержки модернизация системы среднего профессионального образования невозможна. Эта поддержка возможна в форме субсидий, предоставляемых субъектам Российской Федерации на реализацию региональных программ развития среднего профессионального образования.

Помимо государственной поддержки развития системы среднего профессионального образования необходима консолидация ресурсов бизнеса, государства и сферы образования. Для этого нужно совершенствование профессиональной ориентации обучающихся в общеобразовательных организациях и развитие системы среднего профессионального образования с учетом совмещения теоретической подготовки с практическим обучением на предприятии.

Внесение изменений в Налоговый кодекс Российской Федерации повысит мотивацию предприятий к участию в практико-ориентированной (дуальной) модели подготовки высококвалифицированных рабочих кадров, в том числе к развитию материально-технической базы профессиональных образовательных организаций.

Необходимо внесение изменений в Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» в части расширения основных целей деятельности профессиональных образовательных организаций.

Требуется совершенствование участия представителей работодателей в попечительских и наблюдательных советах профессиональных образовательных организаций [14].

Для оценки качества подготовки кадров необходимо создание системы мониторинга, в которой одним из критериев качества подготовки кадров являются результаты участия региональных и отраслевых команд в национальных чемпионатах профессионального мастерства, в том числе в национальном чемпионате «Ворлдскиллс Россия» [14].

Система дуального образования предполагает совместное финансирование программ подготовки кадров под конкретное рабочее место коммерческими предприятиями, заинтересованными в квалифицированном персонале, и региональными органами власти, заинтересованными в развитии экономики и повышении уровня жизни в регионе.

Для ее реализации необходимы системные изменения на каждом этапе обучения. Так, при формировании заказа на набор и обучение студентов при распределении бюджетных мест в образовательных учреждениях необходим учет потребностей компаний конкретного региона или какой-либо высокотехнологичной отрасли России в целом (например, Росатома или Роскосмоса). При этом заказ формируется предприятием на 5–10 лет вперед и обсуждается на уровне совета директоров в соответствии с текущим состоянием штатного расписания и перспективами развития.

Обучение должно вестись по федеральным образовательным стандартам профессионального образования, разработанным на основе профессиональных стандартов. Формирование учебной программы и набор дидактических единиц конкретной дисциплины должны быть согласованы с предприятием-заказчиком. Обучение должно быть максимально ориентировано на конкретное производство, а большая часть практических занятий должна проходить в центре обучения и цехах предприятий.

Красноярский край – участник проекта. Красноярский край стал одним из участников-победителей по итогам конкурсного отбора «пилотных» регионов по подготовке рабочих кадров на основе дуального образования. Участниками проекта в Красноярском крае являются предприятия машиностроительного комплекса – АО «Красмаш», АО «ИСС», АО «НПП «Радиосвязь» и образовательные учреждения – Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, Сибирский федеральный университет, Сосновоборский автомеханический техникум, Красноярский техникум промышленного сервиса, Красноярский колледж радиоэлектроники, экономики и управления.

23 июля 2014 г. вышел приказ Минобрнауки России № 780, в соответствии с которым статус «Федеральная инновационная площадка» (ФИП) был присвоен 59 профессиональным образовательным организациям, участвующим в реализации проекта «Подготовка рабочих кадров, соответствующих требованиям высокотехнологичных отраслей промышленности, на основе дуального образования» [15].

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева получил статус ФИП на 2014–2016 годы и приступил в Аэрокосмическом колледже к подготовке специалистов по системе дуального образования среднего профессионального образования. В рамках проекта разработаны профессиональные образовательные программы по профессиям «Оператор станков с программным управлением», «Токарь», «Фрезеровщик». Реализация этого проекта осуществляется совместно с предприятиями оборонно-промышленного комплекса Красноярского края АО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева» и АО «Красмаш».

Заключение. Реализация проекта по переходу системы профессионального образования в регионах России на практико-ориентированное (дуальное) обучение позволит сформировать на инновационных предприятиях такое кадровое обеспечение, которое позволит обеспечить повышение производительности труда, а также будет способствовать ускорению снизу процесса создания и модернизации высокопроизводительных рабочих мест. При этом предприятия могут воспользоваться не только государственной системой подготовки кадров, но и получить государственную поддержку по компенсации собственных затрат.

Библиографические ссылки

1. Суворова И. Миллиард рублей на внедрение дуальной системы // Профессиональное образование. Столица. 2014. № 6. С. 13.

2. Хармс М. О необходимости внедрения элементов дуального профессионального образования в России. Экспертное мнение Российско-Германской внешнеторговой палаты по дуальному образованию [Электронный ресурс]. URL: http://asi.ru/bitrix/tools/form_show_file.php?rid=7267&hash=403c0728d1ef0e89ad4ec03cd87c7a8d&lang=ru&action=download (дата обращения: 22.09.2015).

3. Агентство стратегических инициатив. Системный проект. Подготовка рабочих кадров, соответствующих требованиям высокотехнологичных отраслей промышленности, на основе дуального образования [Электронный ресурс]. URL: http://asi.ru/projects/7267/ (дата обращения: 22.09.2015).

4. Шмелева Е. Парту поставят к станку // Российская газета. 2014. № 936 С. 9.

5. Досканова А. В. Стратегический проект подготовки высококвалифицированных рабочих кадров // Профессиональное образование. 2014. № 11. С. 9–11.

6. Федотова Г. А. Творческое саморазвитие учителя в сельском социуме как педагогическая проблема : дис. … д-ра пед. наук. Великий Новгород : НГУ, 2004. 333 с.

7. Брылевич А., Кранц С. Дуальное обучение: опыт Германии и реалии России. Дуальная система [Электронный ресурс] // Управление производством. 2008. № 1. URL: http://www.up-pro.ru/library/personnel_management/training/dyalnoe_obychen.html (дата обращения: 22.09.2015).

8. Коваленко А. Не тот еще кадр [Электронный ресурс] // Эксперт Урал. 2014. № 21 (601). URL: http://expert.ru/ural/2014/21/ne-tot-esche-kadr/ (дата обращения: 22.09.2015).

9. Миллиард рублей будет выделено на модернизацию среднего профессионального образования. Профобразование : форум для преподавателей средних специальных учебных заведений [Электронный ресурс]. URL: http://www.Profobrazovanie.org/t5484-topic (дата обращения: 22.09.2014).

10. План мероприятий по обеспечению повышения производительности труда, создания и модернизации высокопроизводительных рабочих мест : распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.07.2014 № 1250-р. [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/media/files/41d4efe52a44b03a3530.pdf (дата обращения: 22.09.2015).

11. Меры государственной поддержки промышленных предприятий в рамках Минпромторга России [Электронный ресурс]. URL: http://mpr.midural.ru/UPLOAD/user/file/new/fedmergp.pdf (дата обращения: 22.09.2015).

12. План мероприятий, направленный на популяризацию рабочих и инженерных профессий. : распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.03.2015 № 366-р. [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/media/files/jWQG6SqaAJU.pdf (дата обращения: 22.09.2015).

13. О Всероссийском конкурсе профессионального мастерства «Лучший по профессии» : постановление Правительства Российской Федерации от 7 декабря 2011 г. № 1011 [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/902316629 (дата обращения: 22.09.2015).

14. Комплекс мер, направленных на совершенствование системы среднего профессионального образования, на 2015–2020 годы : распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.03.2015 № 349-р. [Электронный ресурс]. URL: http://government.ru/media/files/cWukCnDBv5U.pdf (дата обращения: 22.09.2015).

15. О федеральных инновационных площадках : приказ Минобрнауки России № 780 от 23.07.2014 [Электронный ресурс]. URL: http://fip.kpmo.ru/res_ru/0_hfile_930_1.pdf (дата обращения: 22.09.2015).

References

1. Syvorova I. [Billion rubles for the implementation of the dual system]. *Professional'noe obrazovanie. Stolitsa.* 2014, No. 6, P. 13 (In Russ.).

2. Harms M. *O neobkhodimosti vnedreniya elementov dual'nogo professional'nogo obrazovaniya v Rossii. Ekspertnoe mnenie Rossiysko-Germanskoy vneshnetorgovoy palaty po dual'nomu obrazovaniyu* [On the need to introduce elements of the dual vocational training in Russia. Expert opinion of the Russian-German Chamber of Commerce for dual education]. (In Russ.). Available at: http://asi.ru/bitrix/tools/form_show_file.php?rid=7267&hash=403c0728d1ef0e89ad4ec03cd87c7a8d&lang=ru&action=download (accessed 22.09.2015).

3. Agency for Strategic Initiatives. System project. Training skilled workers that meet the requirements of high-tech industries, based on the dual education. (In Russ.). Available at: http://asi.ru/projects/7267/ (accessed 22.09.2015).

4. Shmeleva E. [The desk set to the machine]. *Rossiyskaya gazeta.* 2014, No. 936, P. 9 (In Russ.).

5. Doskanova A. V. [Strategic project of training of highly skilled workers]. *Professional'noe obrazovanie*, 2014, No. 11, P. 9–11 (In Russ.).

6. Fedotova G. A. *Tvorcheskoe samorazvitie uchitelya v sel'skom sotsiume kak pedagogicheskaya problema. Dis. d-ra pedagog. nauk.* [Creative self-development of the teacher in rural society as a pedagogical problem. Dr. educ. sci. diss.]. Velikiy Novgorod, NGU Publ., 2004. 333 p.

7. Brylevich A., Krantz S. [Dual training: the experience of Germany and the Russian realities. Dual System]. *Upravlenie proizvodstvom.* 2008, No. 1 (In Russ.). Available at: http://www.up-pro.ru/library/personnel_management/training/dyalnoe_obychen.html (accessed 22.09.2015).

8. Kovalenko A. [Not the still cadre]. *Expert Ural.* 2014, No. 21 (601) (In Russ.). Available at: http://expert.ru/ural/2014/21/ne-tot-esche-kadr/ (accessed 22.09.2015).

9. *Milliard rubley budet vydeleno na modernizatsiyu srednego professional'nogo obrazovaniya. Profobrazovanie. Forum dlya prepodavateley srednikh spetsial'nykh uchebnykh zavedeniy.* [Billion rubles will be allocated for the modernization of vocational education. Vocational education. A forum for teachers of secondary special educational institutions]. (In Russ.). Available at: http://www.Profobrazovanie.org/t5484-topic (accessed 22.09.2014).

10. RF Government Order “Interventions plan for improving productivity, development and modernization of high-performance workplaces” of 09.07.2014 No. 1250-r. (In Russ.). Available at: http://government.ru/media/files/41d4efe52a44b03a3530.pdf (accessed 22.09.2015).

11. *Mery gosudarstvennoy podderzhki promyshlennykh predpriyatiy v ramkakh Minpromtorga Rossii.* [Measures of state support of industrial enterprises within the Russian Ministry Industry and Trade]. (In Russ.). Available at: http://mpr.midural.ru/UPLOAD/user/file/new/fedmergp.pdf (accessed 22.09.2015).

12. RF Government Order “Plan of measures aimed at promoting the workers and engineering professions” of 05.03.2015 No. 366-r. (In Russ.). Available at: http://government.ru/media/files/jWQG6SqaAJU.pdf (accessed 22.09.2015).

13. RF Government Order “The All-Russia competition of professional skill "Best in Profession" of 07.12.2011 No. 1011. (In Russ.). Available at: http://docs.cntd.ru/document/902316629 (accessed 22.09.2015).

14. RF Government Order “The complex of measures aimed at improving the system of vocational education in the years 2015-2020” of 03.03.2015 No. 349-r. (In Russ.). Available at: http://government.ru/media/files/cWukCnDBv5U.pdf (accessed 22.09.2015).

15. RF Ministry of Education and Science Order “On the federal innovation platforms” of 23.07.2014 No. 780 (In Russ.). Available at: http://fip.kpmo.ru/res_ru/0_hfile_930_1.pdf (accessed 22.09.2015).

© Таюрский А. И., Левко В. А., 2015

УДК 338.2

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1078–1081

РЕАЛИЗАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК НА РЯДЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Н. А. Тестоедов[1], Г. Г. Крушенко[2, 3*], Е. А. Морозов[1], В. В. Двирный[1], К. В. Катык[4]

[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, 50/44
[3]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[4]ПО «Полет» – филиал ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева»
Российская Федерация, 644021, г. Омск, ул. Б. Хмельницкого, 226
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

В мировой литературе насчитываются сотни определений понятия «инновации», но суть их всех сводится к тому, что инновации – это превращение научных достижений в новые реальные «физические» и интеллектуальные продукты и услуги, обладающие новыми качествами, являющиеся результатом процесса воплощения новой идеи или метода в практику, что может улучшить качество жизни. Это вложение средств в экономику, обеспечивающее смену техники и технологии; новая техника, технология, являющаяся результатом достижений научно-технического прогресса. Определяющим фактором инновации является развитие изобретательства, рационализации, появление крупных открытий. При этом главным условием спроса экономики на инновации является конкуренция, которая заставляет искать лучшие технологические решения, обновлять продукцию. Основой экономического роста является успешная предпринимательская деятельность, а предприниматели, вносящие творческий элемент в свою работу, обеспечивают прорывы в экономике. Высокий уровень образования населения России, огромное наследие фундаментальной науки, наличие инженерных школ, сохранившаяся во многих отраслях база опытного производства позволяют успешно осваивать новые инновационные направления. Однако внедрение инноваций может происходить только при определенных сложившихся финансовых условиях и при наличии высококвалифицированных кадров. Что касается инноваций в аэрокосмической отрасли России, которые можно выразить в виде патентования разработок, то по данным 2014 года Россия входит в пятерку мировых лидеров в области научно-технических разработок для космоса, причем в число патентных лидеров входит АО «Информационные спутниковые системы» им. М. Ф. Решетнева» и ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М. В. Хруничева», омским филиалом которого является ПО «Полет», на которых большое значение придается изобретательской деятельности сотрудников, подготовке инженерных инновационных кадров.

Ключевые слова: инновации, аэрокосмическая отрасль, патентование изобретений.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1078–1081

IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE DEVELOPMENTS AT A NUMBER OF AEROSPACE COMPANIES

N. A. Testoedov[1], G. G. Krushenko[2, 3*], E. A. Morozov[1], V. V. Dvirniy[1], K. V. Katyk[4]

[1]JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin St., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
[2]Institute of Computational Modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
[3]Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[4]PA “Polet” branch of FSUE “SRPSC named after M. V. Khrunichev”
226, B. Khmelnytsky St., Omsk, 644021, Russian Federation
[*]E-mail: genry@icm.krasn.ru

In the world literature there are hundreds of definitions of the term “innovation”, but their essence comes down to the fact that innovation is the transformation of scientific achievements, new real physical and intellectual products and

services possessing new qualities, resulting from the process of translating a new idea or method in practice that can improve the quality of life is an investment in the economy, provides a change of equipment and technologies; new techniques, technology, which is the result of scientific and technological progress. Determinant of innovation is the development of inventions, rationalization, and the emergence of major discoveries. Thus, the main condition of demand of economy on an innovation is competition, which makes us look for the best technological decisions, to update production. The basis of economic growth is a successful entrepreneur, and entrepreneurs are contributing a creative element in their work, provide breakthroughs in the economy. A high level of education of the Russian population, a huge legacy of fundamental science, the presence of engineering schools, preserved in many industries base pilot production – can successfully learn new innovative directions. However, innovation can only occur under certain prevailing financial conditions and the availability of qualified personnel. With regard to innovation in the aerospace industry that can be expressed in the form of patenting of development, in 2014 Russia is among the five world leaders in the field of scientific and technological developments for space exploration, and in the number of patent included the leaders of the JSC "Information satellite systems" named after M. F. Reshetnev" and Khrunichev State Research and Production Space Center, Omsk branch of which is PA "Polyot", where great importance is attached to the inventive activity of employees, preparation of engineering and innovative personnel.

Keywords: innovation, aerospace industry, patenting of inventions.

Введение. Одним из первых, кто сформулировал такую экономическую категорию, как «инновация», был известный экономист Й. А. Шумпетер [1]. Под инновацией он понимал внедрение новых продуктов, услуг, открытий месторождений и т. п. К настоящему времени в мировой литературе насчитывается большое количество определений понятия «инновации», но суть их всех сводится к тому, что инновации – это превращение потенциального научно-технического прогресса, научных достижений в новые реальные «физические» и интеллектуальные продукты и услуги, обладающие новыми качествами [2]. При этом определяющим фактором инновации является развитие рационализации, изобретательства, патентование и внедрение запатентованных разработок.

Инновации. Высокий уровень образования населения России, огромное наследие фундаментальной науки, наличие инженерных школ, сохранившаяся во многих отраслях база опытного производства позволяют успешно осваивать новые инновационные направления. Главным фактором успеха при этом являются кадры – научно-инженерный потенциал, которым располагает страна, и степень эффективности его использования, что особенно отчетливо прослеживается при анализе работы предприятий оборонно-промышленного комплекса [3]. В фундаментальном исследовании «Стратегия–2020» [4] представлены основные возможные сценарии инновационного развития применительно к России.

«Прогрессорский сценарий» предусматривает форсированное встраивание в глобальную экономику на постиндустриальном этапе. При этом инновации заключаются в разработке и внедрении пакетов инструментов стимулирования спроса на инновации и поддержке их предложения.

Согласно умеренному сценарию должно происходить постепенное наращивание инновационного развития, которое должно заключаться в привлечении внебюджетных средств, в поддержке креативного (*creative* – творческий, созидательный, изобретательный) класса и общеэкономической среды.

При реализации инерционного сценария сохраняется сложившееся состояние экономики в условиях ее медленного роста, сырьевой ориентации и зависимости от внешней конъюнктуры. Инновации при этом акцентируются на ситуационных решениях и мягких реформах при адаптации готовых технологий и производств.

При этом каждый из этих сценариев может быть реализован только с помощью соответствующим образом подготовленных кадров. Конечной целью реализации любого из описанных сценариев является устойчивое функционирование промышленного предприятия, основные положения которого рассмотрены в работе [5] и которые актуальны и в настоящее время.

Инновации в аэрокосмической отрасли. Среди других отраслей промышленного производства особенно остро нуждается в высококвалифицированных кадрах оборонная промышленность [3], включая и аэрокосмическое машиностроение [6], успешная деятельность которого практически построена на инновациях. Производственная деятельность ракетно-космических предприятий отличается от других машиностроительных предприятий целым рядом особенностей, основными из которых следует считать экстремальные условия эксплуатации космических аппаратов [7], что диктует необходимость применения передовых технологий и постоянного их совершенствования [8], которые должны базироваться на инновационном подходе [3].

Для успешной работы в этом направлении следует руководствоваться Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» [9], в котором предусмотрено 8 приоритетных направлений, среди которых выделен п. 7. «Транспортные и космические системы», а в перечне критических технологий, состоящем из 27 позиций, приведен п. 24 «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения».

Для реализации приоритетных направлений государство выделяет значительные средства, и объективной оценкой полученных технических результатов являются полученные патенты на разработки, которые являются официальным признанием мировой новизны полученного результата, практического вклада в развитие инновационной экономики [10].

РИД АО «ИСС» за период с 2003 по 2015 год

Год	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015
Подано заявок на патентование	33	36	57	55	77	87	57
Получено патентов	31	34	55	50	70	14	57
Внедрено	11	18	15	14	19	2	22
Заявки на регистрацию в ФИПС	–	–	–	–	–	73	10
Регистрация программ для ЭВМ и баз данных	–	22	18	–	72	37	6

Что касается инноваций в аэрокосмической отрасли России, которые можно выразить в виде патентования разработок, то по последним данным (2014 год) Центрального экономико-математического института РАН [11] Россия входит в пятерку мировых лидеров в области научно-технических разработок для космоса, причем патентными лидерами в классе B64, подклассе B64G (воздухоплавание, авиация, космонавтика) являются: 1) РКК «Энергия» имени С. П. Королева»; 2) АО «Информационные спутниковые системы» имени М. Ф. Решетнева». На этих предприятиях большое значение придается изобретательской деятельности.

Всего в АО «ИСС» по состоянию на 1 мая 2015 года создано 4207 результатов интеллектуальной деятельности (РИД), получивших правовую охрану. Из них по состоянию на сегодняшний день поддерживается 685 РИД, в том числе: 398 патентов на изобретения, 7 патентов на полезные модели, 16 патентов на промышленные образцы, 254 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 8 свидетельств о государственной регистрации баз данных, 2 свидетельства о государственной регистрации товарных знаков. Внедрение от охраняемых РИД составило за 10 лет 30 %. Анализ динамики создания патентоспособных РИД за период 2003–2015 гг. приведен в таблице.

Инновационные кадры. В качестве примера системного инновационного подхода к решению кадрового вопроса в этой отрасли можно привести и пример аэрокосмического предприятия ПО «Полет» – филиала ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева» [12], в котором разработана концепция по отбору и подготовке молодых кадров по основным направлениям конструирования, производства и эксплуатации космических аппаратов различного назначения. Анализ этой концепции показывает, что она явно относится к «прогрессорскому сценарию», подготовка инженерных кадров по которому заключается в совершенствовании и развитии профессиональных компетенций на уровне элитного образования [13], под которым понимают образование, которое обеспечивает наличие хороших фундаментальных знаний и умение продуктивно ими распоряжаться, получая при этом новые, порой неочевидные, результаты, а также формирует способность к дальнейшему саморазвитию и самообразованию в зависимости от изменяющихся требований общества, что и можно отнести к инновационному образованию [14]. Примером инновационного аэрокосмического образования может служить система подготовки кадров для аэрокосмической отрасли, разработанная Сибирским государственным аэрокосмическим университетом имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГАУ) совместно с АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» и Красноярским научным центром Сибирского отделения РАН, которая успешно применяется в СибГАУ при разработке студентами реальных элементов и устройств для спутников [15]. Прошедшие эту школу выпускники СибГАУ в основном работают в аэрокосмической отрасли, куда они приходят практически готовыми высококвалифицированными специалистами.

В направлении интенсификации инновационной патентной деятельности в ПО «Полет» эффективно действует программа «школа → вуз → предприятие», целью которой является отбор и привлечение перспективных молодых людей к производственной деятельности путем использования инновационных методик [16]. Задача подготовки инновационных кадров для ПО «Полет» особенно важна в связи с необходимостью постоянного совершенствования и освоения новой техники, в частности, в связи с решением к концу 2015 года освоить полную сборку ракеты-носителя «Ангара» [17].

Заключение. Под термином «инновация» понимается введение в обращение новых продуктов и услуг, которые позволяют экономить ресурсы, оптимизировать процессы производства, представлять на рынке новые идеи и открывать новые возможности, извлекая дополнительную прибыль. Определяющим фактором инновации является развитие изобретательства. Успешная инновационная деятельность показана на примере некоторых предприятий аэрокосмической отрасли.

Библиографические ссылки

1. Shumpeter I. Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analisis of the Capitalist Process. New York : McGraw Hill, 1939. Vol. 1. 385 p.

2. Агарков С. А., Кузнецова Е. С., Грязнова М. О. Инновационный менеджмент и государственная инновационная политика : учеб. пособие. Пенза : Академия естествознания, 2011. 267 с.

3. Катык К. В., Крушенко Г. Г. Оборонно-промышленный комплекс России: проблемы и решения // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5. С. 212–215.

4. Стратегия–2020: Новая модель роста – новая социальная политика // Итоговый доклад о результатах экспертной работы по актуальным проблемам социально-экономической стратегии России на период до 2020 года. М. : Изд. дом «Дело» РАНХиГС, 2013. Кн. 1. 222 с.

5. Цау К. К. Планирование устойчивого развития промышленного предприятия : автореф. дис. … канд. экон. наук : 08.00.05 / Сибирский государственный аэрокосмический университет. Красноярск. 2003. 24 с.

6. Катык К. В., Решетникова С. Н., Цау К. К. Состояние с кадрами в оборонной и аэрокосмической

отрасли // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. научн. конф. / СибГАУ. Красноярск. 2012. Ч. 2. С. 811–812.

7. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения / СибГАУ. Красноярск. 2011. 488 с.

8. Эффективные технологии в машиностроении / Г. Г. Крушенко [и др.] // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. научн. конф. / СибГАУ. Красноярск. 2007. С. 180–181.

9. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 [Электронный ресурс]. URL: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/55071684/#ixzz3lEvYCZ2I (дата обращения: 15.10.2015).

10. Зиньковская Т. М. Патенты как сгусток информационных ресурсов инновационной экономики (на примере Пермского края) // Информационные ресурсы России. 2012. № 4. С. 11–12.

11. Андрейчикова О. Н., Козырев А. Н. Патентный анализ аэрокосмического рынка [Электронный ресурс] / Лаборатория экспериментальной экономики ЦЭМИ РАН. URL: http://www.labrate.ru/20141021/patent_analysis_of_the_aerospace_market-2014.pdf (дата обращения: 25.08.2015).

12. Катык К. В. Научные конференции как система подготовки кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса // Кадровик. 2013. № 9. С. 113–116.

13. Романкова Л. И. Элитное образование для инновационной экономики // Высшее образование в России. 2004. № 11. С. 86–91.

14. Воейкова О. Б. Концептуальные основы инноватизации высшей школы / СибГАУ. Красноярск. 2014. 162 с.

15. Kovalev I., Loginov Yu., Zelenkov P. An Integrated System of Training Engineers for Aerospace Industry in Siberia Using Innovative Technology of the Student Project-and-team Work // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 174. P. 537–543.

16. Федоров И. В., Лезина О. В. Технология проектирования научно-инновационно-образовательной программы подготовки инженерно-технических кадров // Инженерное образование. 2007. № 4. С. 44–52.

17. The rocket «Angara» will collect in Omsk [Электронный ресурс] // Rus News Journal. URL: http://rusnewsjournal.com/5/80407/ (дата обращения: 17.10.2015).

References

1. Shumpeter I. Business Cycles: A *Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. New York, McGraw Hill, 1939, Vol. 1, 385 p.

2. Agarkov S. A., Kuznetsova E. S., Gryaznova M. O. *Innovatsionnyy menedzhment i gosudarstvennaya innovatsionnaya politika: uchebnoe posobie* [Innovation management and state innovation policy: a tutorial]. Penza, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2011, 267 p.

3. Katyk K. V., Krushenko G. G. [The military-industrial complex of Russia: problems and solutions]. *Vestnik SibGAU*, 2012, No. 5 (45), P. 212–215 (In Russ.).

4. *Strategiya-2020: Novaya model' rosta – novaya sotsial'naya politika. Itogovyy doklad o rezul'tatakh ekspertnoy raboty po aktual'nym problemam sotsial'no-ekonomicheskoy strategii Rossii na period do 2020 goda* [Strategy 2020: New growth model – new social policy. The final report on the results of expert research into socio-economic strategy of Russia for the period till 2020]. Moscow, Delo Publ., 2013. Kn. 1. 222 p.

5. Tsau K. K. *Planirovanie ustoychivogo razvitiya promyshlennogo predpriyatiya: avtoref. Dis. kand. ekonomich. nauk.* [Planning for sustainable development of industrial enterprises. Cand. econ. sci. dis.]. Krasnoyarsk, 2003, 24 p.

6. Katyk K. V., Reshetnikova S. N., Tsau K. K. [The condition with the human frames in the defense and aerospace industry]. *Reshetnevskie chteniya: Materialy XVI Mezhdunar. nauchn. konf.* [Reshetnev readings: Materials of the XVI Intern. sci. conf.]. Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2012, Part 2, P. 811–812 (In Russ.).

7. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2001, 488 p.

8. Krushenko G. G., Fil'kov M. N., Reshetnikova S.N. et al. [Effective engineering technologies]. *Reshetnevskie chteniya*: *Materialy XI Mezhdunar. nauchn. konf.* [Reshetnev readings: Materials of the XI Intern. Sci. Conf.]. Krasnoyarsk, 2007, P. 180–181 (In Russ.).

9. The presidential decree of July 7, 2011 № 899 "On approval of the priority directions of science, technologies and technics in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation" (In Russ.).

10. Zin'kovskaya T. M. [Patents as a bundle of information resources innovation economy (on the example of Perm Krai)]. *Informatsionnye resursy Rossii*. 2012, No. 4, P. 11–12 (In Russ.).

11. Andreychikova O. N., Kozyrev A. N. *Patentnyy analiz aerokosmicheskogo rynka* [Patent analysis of the aerospace market]. (In Russ) Available at: http://www.labrate.ru/20141021/patent_analysis_of_the_aerospace_market-2014.pdf (assessed 25.08.2015).

12. Katyk K. V. [Scientific conferences as a system of training for the enterprises of the military-industrial complex]. *Kadrovik.* 2013, No. 9, P. 113–116 (In Russ.).

13. Romankova L. I. [Elite education for the innovation economy]. *Vysshee obrazovanie v Rossii*. 2004, No. 11, P. 86–91 (In Russ.).

14. Voeykova O. B. *Kontseptual'nye osnovy innovatizatsii vysshey shkoly* [Conceptual framework innovation higher school]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2014, 162 p.

15. Kovalev I., Loginov Yu., Zelenkov P. An Integrated System of Training Engineers for Aerospace Industry in Siberia Using Innovative Technology of the Student Project-and-team Work. *Procedia – Social and Behavioral Sciences.* 12 February 2015, Vol. 174, P. 537–543.

16. Fedorov I. V., Lezina O. V. [Design technology research and innovative educational programs for the training of technical personnel]. *Inzhenernoe obrazovanie.* 2007, No. 4. P. 44–52 (In Russ.).

17. The rocket "Angara" will collect in Omsk. *Rus News Journal,* 17.10.2015, available at: http://rusnewsjournal.com/5/80407/ (assessed 17.10.2015).

© Тестоедов Н. А., Крушенко Г. Г., Морозов Е. А., Двирный В. В., Катык К. В., 2015

УДК 338.45.01; 658.5.011

Вестник СибГАУ
Т. 16, № 4. С. 1082–1088

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СБАЛАНСИРОВАННЫХ СТРАТЕГИЙ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ В ПЕРИОД ЕЕ РЕФОРМИРОВАНИЯ

О. В. Фирулев*, Ю. В. Ерыгин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
*E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru

В настоящее время в Российской Федерации уделяется большое внимание проблеме повышения эффективности управления ракетно-космической отраслью. Описана структура Объединенной ракетно-космической корпорации, которая была создана с целью исключения дублирования функций и технических решений, а также с целью концентрации усилий и ресурсов для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, отвечающих современным требованиям. Определены требования к стратегическому управлению ракетно-космической отраслью Российской Федерации в период ее реформирования. Рассмотрено понятие стратегии и основные подходы к его определению. Выявлено, что однозначного и универсального понятия стратегии нет, однако можно с уверенностью говорить о его количественном и качественном выражениях. Уточнено определение понятия «стратегия» ввиду происходящих структурных изменений в ракетно-космической отрасли. Определен характер взаимодействия стратегий между уровнями управления для различных типов функциональных стратегий. Обоснована необходимость в разработке концепции формирования сбалансированных стратегий в ракетно-космической отрасли. В связи с этим определены основные принципы концепции формирования сбалансированных стратегий, а именно: принцип сбалансированности по функциональным стратегиям; принцип соблюдения условий финансовой устойчивости и/или воспроизводства инновационного потенциала; принцип сбалансированности функциональных стратегий по отношению к сфере производства для государственного заказа; принцип учета ограниченных финансовых ресурсов, выделяемых на государственный оборонный заказ.

Ключевые слова: ракетно-космическая отрасль, Объединенная ракетно-космическая корпорация, стратегия, стратегическое управление.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 4, P. 1082–1088

THE PRINCIPLES OF FORMING OF BALANCED STRATEGIES IN THE RUSSIAN ROCKET AND SPACE INDUSTRY DURING THE PERIOD OF ITS REFORM

O. V. Firulev*, Y. V. Erygin

Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
*E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru

At present a great attention is paid to the problem of increasing the efficiency of Russian rocket and space industry control. In this article we discuss the structure of the United Rocket and Space Corporation. This corporation was established in order to exclude the duplication of functions and technical solutions and to concentrate on efforts and resources for implementation of scientific-research and experimental-design works meeting the modern requirements. We identified the requirements in the strategic management of the Russian rocket and space industry during the period of its reform. We reviewed the notion of the "strategy" and the main approaches to its definition. It was revealed that there is no unambiguous and universal notion of strategy, however, we certainty can say about its quantitative and qualitative terms. We tried to clarify the definition of the notion "strategy", in view of the ongoing structural changes in the rocket and space industry. The character of the interaction between the levels of management strategies for various types of functional strategies was defined. We have defined the necessity of developing of the concept of balanced strategies to the Russian rocket and space industry. The main principles of the concept of balanced strategies will be: the principle of balance of functional strategies; compliance with the principle of financial stability and reproduction of innovation capacity; the principle of balance of functional strategies in relation to the production for the state defense order; the principle of limited financial resources allocated to the state defense order.

Keywords: rocket and space industry, United Rocket and Space Corporation, strategy, strategic management.

Введение. Российская ракетно-космическая отрасль в целом занимает на рынке производства ракетно-космической техники достаточно устойчивую нишу, уступая только США и Европе [1].

В настоящее время, ввиду сложившейся макро- и микроэкономической ситуации, в Российской Федерации уделяется большое внимание проблеме повышения эффективности управления той или иной отраслью. И ракетно-космическая отрасль не является исключением.

Структура Объединенной ракетно-космической корпорации. Вице-премьер Дмитрий Рогозин 2 июля 2013 года предложил реформировать ракетно-космическую отрасль путем создания акционерного общества «Объединенная ракетно-космическая корпорация», 100 % акций которого будут принадлежать государству [2]. Целью реформирования ракетно-космической отрасли Российской Федерации является исключение дублирования функций и технических решений. Объединенная ракетно-космическая корпорация (ОРКК) будет принимать общие технические решения и предъявлять одинаковые требования к предприятиям, что устранит конкуренцию между ними на внутреннем рынке и усилит их влияние на внешнем. Должна произойти концентрация усилий для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, отвечающих современным требованиям.

Президент России Владимир Путин 2 декабря 2013 года подписал Указ № 874 «О системе управления ракетно-космической отраслью». 5 марта 2014 года в России зарегистрирована Объединенная ракетно-космическая корпорации.

В состав Объединенной ракетно-космической корпорации должны войти 10 интегрированных корпоративных структур, состоящих из 48 предприятий, а также 14 самостоятельных организаций ракетно-космической отрасли, в том числе 8 акционерных обществ и 6 федеральных государственных унитарных предприятий после их преобразования в открытые акционерные общества; 100 % акций ОРКК находится в федеральной собственности. Структура Объединенной ракетно-космической корпорации представлена на рисунке [3].

По состоянию на 10 октября 2014 года в состав Объединенной ракетно-космической корпорации уже вошли 6 интегрированных корпоративных структур: АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева»; ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»; ОАО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А. Г. Иосифьяна»; ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем»; АО «Государственный ракетный центр им. академика В. П. Макеева»; ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева», а также 5 самостоятельных организаций: ОАО «НПО «Энергомаш» им. академика В. П. Глушко»; ОАО «Институт подготовки кадров машиностроения и приборостроения»; ПАО «Научно-производственное объединение «Искра»; ОАО «Машиностроительный завод «Арсенал»; ОАО «Композит». Акции перечисленных выше организаций переданы в уставный капитал ОРКК.

3 декабря 2014 г. Президент России Владимир Путин подписал указ № 750 «О некоторых вопросах открытого акционерного общества «Объединенная ракетно-космическая корпорация». Указ разработан для сохранения и развития научно-производственного потенциала предприятий ракетно-космической промышленности России и предусматривает повышение роли ОРКК в формировании органов управления организаций промышленности и выработке решений, связанных с реализацией полномочий собственника ФГУПов. Указ устанавливает возможность участия ОРКК в управлении АО, акции которых еще не внесены в уставный капитал корпорации. Также в соответствии с указом ОРКК участвует в выработке федеральными органами исполнительной власти решений по подготовке проектов документов стратегического планирования и проекта государственного оборонного заказа; целесообразности и технической возможности реализации проектов разработки и создания космической техники, научно-технических, инвестиционных и других программ [3].

С одной стороны, создание ОРКК должно привести к интеграции разработчиков и производителей ракетно-космической техники в единую структуру, которая позволит более эффективно использовать имеющиеся ресурсы предприятий [4].

С другой стороны, для предприятий, входящих в состав объединенной корпорации, существует вероятность ограничения их самостоятельности. Это может повлиять на возможность использования ими дополнительных ресурсов, что может ухудшить показатели эффективности систем управления предприятиями [4].

Однако уже 21 января 2015 года Президентом России Владимиром Путиным было поддержано предложение премьер-министра Дмитрия Медведева о создании госкорпорации на базе Федерального космического агентства и ОРКК.

13 июля 2015 года был подписан Федеральный закон № 215-ФЗ «О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». Согласно данному закону, за новой структурой закреплены функции главного распорядителя бюджетных средств, получателя бюджетных средств, главного администратора доходов бюджета, администратора доходов бюджета, государственного заказчика, государственного заказчика – координатора, ответственного исполнителя государственной программы вооружения, государственных программ Российской Федерации, президентских программ, Федеральной космической программы России, межгосударственных и федеральных целевых программ, государственного оборонного заказа, федеральной адресной инвестиционной программы, программ союзного государства и программ международного сотрудничества в области космической деятельности [5].

Ввиду происходящих структурных изменений в ракетно-космической отрасли перед вышестоящей организацией возникает сложная задача повышения

эффективности управления интегрированными корпоративными структурами и самостоятельными организациями ракетно-космической отрасли, причем вопрос повышения эффективности именно стратегического управления является одним из ключевых аспектов данной задачи.

Определение требований к стратегическому управлению ракетно-космической отраслью в период ее реформирования. С появлением новой управляющей структуры в ракетно-космической отрасли возможны изменения задач и методов формирования стратегии. Для оценки этих изменений необходимо провести анализ содержания понятия «стратегия».

Понятие «стратегия» восходит в своей этимологии к греческому слову *strategia*, состоящему из частей *stratos* – войско и *ago* – веду, т. е. по происхождению является военным термином.

В самом общем виде стратегия – это генеральное направление действия организации, следование которому в долгосрочной перспективе должно привести ее к достижению стоящей перед ней цели [6].

На основе различных наиболее известных определений стратегии авторы учебного пособия «Стратегический менеджмент» [7] прослеживают, как по мере возрастания требований внешней среды изменялись принципы формирования стратегического поведения хозяйствующих субъектов. Некоторые определения понятия «стратегия», отражающие усложняющий характер развития подходов по стратегическому управлению, приведены в табл. 1.

Структура Объединенной ракетно-космической корпорации

Таблица 1

Определения понятия «стратегия», отражающие усложняющий характер развития подходов по стратегическому управлению

№ п/п	Определение стратегии	Автор	Основной подход
1	Стратегия как метод установления долгосрочных целей организации, программы ее действий и приоритетных направлений по размещению ресурсов [8]	А. Чандлер, 1962 г.	Долгосрочные цели разрабатываются и не подлежат пересмотру до изменения внешних или внутренних условий среды функционирования организации
2	Стратегия как метод определения конкурентных целей организации	Гарвардская школа бизнеса, 1965 г.	Стратегия определяет основные сферы бизнеса, которые компания будет продолжать и/или начнет осуществлять
3	Стратегия как способ реакции на внешние возможности и угрозы, внутренние сильные и слабые стороны [9]	М. Портер, 1980–1985 гг.	Основная задача стратегии заключается в достижении организацией долгосрочных конкурентных преимуществ над соперниками в каждой сфере бизнеса
4	Стратегия как способ установления целей для корпоративного, делового и функционального уровней [10–12]	И. Ансофф, 1965 г., Д. Стейнер, 1977 г., П. Лоранж, 1977 г., и другие авторы	При разработке стратегии следует выделять корпоративные, деловые и функциональные цели с точки зрения различного их влияния на процессы управления в организации
5	Стратегия как последовательная, согласованная и интегрированная структура управленческих решений [13]	Г. Минцберг, 1987 г.	При разработке стратегии основное внимание уделяется формированию планов, которые служат для целей контроля по эффективности достижения стратегических ориентиров
6	Стратегия как способ определения экономических и неэкономических преимуществ, которые организация намеревается предоставить основным заинтересованным группам	–	Стратегия приобретает социальную направленность и рассматривается с точки зрения корпоративной философии и организационной культуры
7	Стратегия как способ развития ключевых конкурентных преимуществ организации [14]	Г. Хамел, 1989 г.	Основу конкурентоспособности составляют особые способности фирмы и внутренние ресурсы
8	Стратегия как набор действий и подходов по достижению заданных показателей деятельности [15]	А. Томпсон, 1995 г.	Стратегия одновременно является преактивной (упреждающей) и реактивной (адаптирующейся)

Из табл. 1 видно, что однозначного и универсального понятия стратегии нет. Однако можно с уверенностью сказать, что при всем своем многообразии понятие «стратегия» имеет как количественное, так и качественное выражение. Количественное выражение понятия «стратегия» заключается в том, что когда мы говорим о стратегии, мы подразумеваем четкую увязку по финансам, времени, ресурсам и исполнителям, т. е. мы подразумеваем некий четкий план, исполнение которого свидетельствует об успешной реализации стратегии. Качественное же выражение понятия «стратегия» исходит из того, что у руководства любой организации есть определенное видение, куда должна двигаться организация в будущем, и для координации этого движения руководством организации определяются некие принципы («ориентиры»), следование которым должно привести к достижению поставленных целей.

Отталкиваясь от того, что Объединенная ракетно-космическая корпорация в данный момент является вышестоящей организацией ракетно-космической отрасли, логично предположить, что при стратегическом управлении под стратегией будет пониматься некий набор принципов («ориентиров»). Но, исходя из уставных целей ОРКК, становится очевидным, что руководство ОРКК будет пользоваться обоими подходами к определению понятия «стратегия» при осуществлении стратегического управления интегрированными корпоративными структурами и самостоятельными организациями ракетно-космической отрасли. Возможно, что на уровне корпорации стратегия будет представлена в форме принципов, а на уровне отдельных предприятий – в форме плана.

Поскольку целью разработки стратегии в общем смысле является выявление главных направлений дальнейшего функционирования предприятия на основе максимального использования научно-технического, производственного, кадрового потенциала и с наиболее полным учетом влияния микро- и макросреды [16], то от того, как будет восприниматься понятие «стратегия» при осуществлении стратегического управления организациями ракетно-космической отрасли, существенным образом зависит выбор как методов ее разработки, так и форм ее представления.

Исходя из этого, под стратегией управления организациями ракетно-космической отрасли авторами статьи предлагается понимать механизм (способ) установления конкурентных преимуществ организаций ракетно-космической отрасли на мировом рынке и обеспечения их устойчивости в долгосрочной перспективе при осуществлении управленческой политики, путем синтеза планового подхода и подхода на основе установления «ориентиров». Под устойчивостью понимается способность организаций адекватно

реагировать на изменение факторов внешней и внутренней среды (изменение спроса и предложения на рынке, изменения на рынке трудовых ресурсов, появление новых технологий, изменение законодательства и т. д.).

Если мы говорим о способности организаций ракетно-космической отрасли реагировать на изменение внешних и внутренних условий, то в первую очередь мы должны обратить внимание на взаимосвязь стратегий вышестоящей организации ракетно-космической отрасли со стратегиями интегрированных корпоративных структур и самостоятельных организаций по функциональному признаку. Для этого определим характер взаимодействия стратегий между уровнями управления для различных типов функциональных стратегий (табл. 2).

Поскольку взаимодействие стратегий осуществляется не только по функциональным направлениям, но и по уровням управления, возникает необходимость обеспечения сбалансированности стратегий организаций ракетно-космической отрасли между собой. Для решения этой задачи необходимо определить сферы сбалансированности и сформулировать принципы формирования сбалансированных стратегий, которые в свою очередь будут определять степень кооперации между интегрированными корпоративными структурами и самостоятельными организациями.

Заключение. Таким образом, для успешной реализации единой технической политики создания современной ракетно-космической техники, обеспечивающей глобальную конкурентоспособность продукции ракетно-космической отрасли России, необходимо разработать концепцию формирования сбалансированных стратегий. [4] Основными принципами этой концепции должны стать:

1. Сбалансированность по функциональным стратегиям. В каждой организации ракетно-космической отрасли существует своя функциональная стратегия, в которой идет четкая увязка по таким составляющим, как финансы, время, ресурсы, исполнители. И если предположить, что вышестоящая организация отрасли попробует просто сложить набор этих стратегий воедино, то эффект будет не просто равен нулю, он будет отрицателен, поскольку ракетно-космическая отрасль должна постоянно развиваться и совершенствоваться, а «пробуксовка», связанная с невыполнением данного принципа, может привести к потере конкурентных преимуществ. В данном случае возникает свойство эмерджентности, т. е. сумма оптимальных стратегий интегрированных корпоративных структур (отдельных компаний) не будет являться оптимальной стратегией совокупности.

2. Соблюдение условий финансовой устойчивости и/или воспроизводство инновационного потенциала. Поскольку в состав вышестоящей организации ракетно-космической отрасли входит несколько десятков организаций, то существует вероятность, что часть из них в определенный момент времени может быть нерентабельна. Здесь следует установить некую планку, ниже которой значения финансовых показателей интегрированных корпоративных структур (отдельных компаний) не будут опускаться.

3. Сбалансированность функциональных стратегий по отношению к сфере производства для государственного заказа (отличительная особенность оборонно-промышленного комплекса России). Отличительной особенностью ракетно-космической отрасли России является то, что подавляющее большинство в структуре заказов организаций составляет государственный заказ. Соблюдение данного принципа при стратегическом управлении интегрированными корпоративными структурами и самостоятельными организациями позволит повысить эффективность использования не только производственных мощностей предприятий ракетно-космической отрасли, но и бюджетных средств.

4. Учет ограниченных финансовых ресурсов, выделяемых на государственный оборонный заказ. Как отмечалось ранее, ОРКК будет участвовать в выработке федеральными органами исполнительной власти решений по подготовке проекта государственного оборонного заказа. Поскольку ограниченность финансовых ресурсов является одним из основных рисков любого проекта, то данный принцип является необходимым условием при формировании сбалансированных стратегий в ракетно-космической отрасли.

Таблица 2

Характер взаимодействия стратегий между уровнями управления для различных типов функциональных стратегий

Тип стратегии	Уровень управления	
	Корпорация	Интегрированная корпоративная структура или АО
Производственная стратегия	Количественное выражение (план)	Количественное выражение (план)
Организационная стратегия	Качественное выражение (принцип)	Качественное выражение (принцип)
Маркетинговая стратегия	Количественное выражение (план)	Количественное выражение (план)
Финансовая стратегия	Количественное выражение (план)	Количественное выражение (план)
НИОКР	Качественное выражение (принцип)	Качественное выражение (принцип)
Стратегия управления персоналом	Качественное выражение (принцип)	Качественное выражение (принцип)

Реализация предложенных принципов требует разработки определенных инструментов формирования сбалансированных стратегий, которые позволят обеспечить достижение цели сбалансированности и будут также направлены на обеспечение поступательного и устойчивого развития ракетно-космической отрасли Российской Федерации с учетом влияния микро- и макросреды, ограниченности ресурсов, временных факторов и т. д.

Библиографические ссылки

1. Беляков Г. П., Еремеева С. В. Понятие и сущность инновационного потенциала наукоемкого предприятия ракетно-космической промышленности [Электронный ресурс] // Теория и практика общественного развития. 2013. № 11. URL: http://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-i-suschnost-innovatsionnogo-potentsiala-naukoemkogo-predpriyatiya-raketno-kosmicheskoy-promyshlennosti (дата обращения: 08.05.2015).

2. Сафронов И. Ключ на рестарт // Телеинформационная сеть военно-промышленного комплекса [Электронный ресурс]. URL: http://www.vpk.ru/cgi-bin/uis/w3.cgi/CMS/Item/crt67509af858f7da6f2c28bea02970656154f0fb68e7c16d2d23c3ff5c597b3a36d8ad16eacf6c2c25e5d84d7b471930e9bc1cf8e25d0b33d6e040447c232b90bb24a5ec5f2a72dcdd7e1d541805e4aa1de0a9111602f5ba5a63411d09c4a218f8cc4c0b20ebed57407b642beb8022dbce632c13f5dc2f4f4b1e09e1a33eeac57d7677869c2c4c076c50c9aa63a69a16737eb5f02949006556c9a835a790117e73eff02948 (дата обращения: 19.12.2013).

3. Объединенная ракетно-космическая корпорация [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosorkk.ru/o-korporatsii/ (дата обращения: 16.12.2014).

4. Фирулев О. В. Стратегическое управление ракетно-космической отраслью России в период ее реформирования // Экономические науки в России и за рубежом : материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. (16 февр. 2015). М. : Спутник +, 2015. С. 65–69.

5. О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» : федер. закон от 13 июля 2015 г. № 215-ФЗ.

6. Виханский О. С., Наумов А. И. Менеджмент : учебник. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Экономистъ, 2006. 670 с. : ил.

7. Чернышев М. А., Бортник Е. М. Стратегический менеджмент : учеб. пособие [Электронный ресурс]. URL: http://www.management61.ru/index.php?do=static&page=11strateg (дата обращения: 19.12.2014).

8. Chandler A. D. Jr. Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise. Cambridge : MIT Press, 1962. 463 p.

9. Портер М. Конкуренция. СПб. : Питер, 2000. 430 с.

10. Ансофф И. Стратегическое управление : пер. с англ. М. : Экономика, 1989. 519 с.

11. Steiner G. Strategic Planning. New York : Free Press, 1979. 383 p.

12. Lorange P. I. and Vancil R. F. Strategic Planning Systems. Englewood Cliffs (N.J.) : Prentice Hall, 1977. 364 p.

13. Минцберг Г., Куинн Дж. Б., Гошал С. Стратегический процесс / пер. с англ. под ред. Ю. Н. Каптуревского. СПб. : Питер, 2001. 608 с.

14. Хамел Г., Прахалад К. К. Конкурируя за будущее. Создание рынков завтрашнего дня : пер. с англ. М. : Олимп-Бизнес, 2002. 288 с.

15. Томсон А. А., Стрикланд А. Дж. Стратегический менеджмент: искусство разработки и реализации стратегии. М. : Банки и биржи: ЮНИТИ, 1998. 576 с.

16. Ерыгин Ю. В., Джежора А. А. Стратегическое планирование на машиностроительных предприятиях ОПК: проблемы выбора школы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2007. № 1. С. 35–44.

References

1. Belyakov G. P., Eremeeva S. V. [Concept and essence of the innovative potential of a high technology enterprise of the aerospace industry]. *Theory and practice of social development.* 2013, No. 11, P. 474–477 (In Russ.). Available at: http://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-i-suschnost-innovatsionnogo-potentsiala-naukoemkogo-predpriyatiya-raketno-kosmicheskoy-promyshlennosti (accessed: 08 May 2015).

2. Safronov I. [The key to restart]. *Teleinformatsionnaya set' voenno-promyshlennogo kompleksa.* Available at: http://www.vpk.ru/cgi-bin/uis/w3.cgi/CMS/Item/crt67509af858f7da6f2c28bea02970656154f0fb68e7c16d2d23c3ff5c597b3a36d8ad16eacf6c2c25e5d84d7b471930e9bc1cf8e25d0b33d6e040447c232b90bb24a5ec5f2a72dcdd7e1d541805e4aa1de0a9111602f5ba5a63411d09c4a218f8cc4c0b20ebed57407b642beb8022dbce632c13f5dc2f4f4b1e09e1a33eeac57d7677869c2c4c076c50c9aa63a69a16737eb5f02949006556c9a835a790117e73eff02948 (accessed: 19 December 2013).

3. *Ob''edinennaya raketno-kosmicheskaya korporatsiya.* [United Rocket and Space Corporation]. Available at: http://www.rosorkk.ru/o-korporatsii/ (accessed: 16 December 2014).

4. Firulev O. V. [Strategic management of the Russian rocket and space industry during the period of its reform]. *Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Ekonomicheskie nauki v Rossii i za rubezhom"* [Materials of XVIII Intern. Scientific. Conf. "Economic science in Russia and overseas"]. Moscow, 2015, P. 65–69 (In Russ.).

5. RF Federal Law "On the State Corporation for Space Activities "Roskosmos"of July 13, 2015 № 215-FZ (In Russ.).

6. Vikhanskiy O. S., Naumov A. I. *Menedzhment* [Management]. Moscow, Ekonomist Publ., 2006, 670 p.

7. Chernyshev M. A., Bortnik E. M. *Strategicheskiy menedzhment* [Strategic management]. Available at: http://www.management61.ru/index.php?do=static&page=11strateg (accessed: 19 December 2014).

8. Chandler A. D. Jr. Strategy, Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise. Cambridge: MIT Press Publ., 1962, 463 p.

9. Porter M. *Konkurentsiya* [Competition]. St. Petersburg, Piter Publ., 2000, 430 p.

10. Ansoff I. *Strategicheskoe upravlenie* [Strategic management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1989, 519 p.

11. Steiner G. Strategic Planning. Free Press, New York, 1979, 383 p.

12. Lorange P. I., Vancil R. F. Strategic Planning Systems. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice Hall, 1977, 364 p.

13. Mintsberg G., Kuinn Dzh. B., Goshal S. *Strategicheskiy protsess* [Strategic process]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001, 608 p.

14. Khamel Gari, Prakhalad K. K. *Konkuriruya za budushchee. Sozdanie rynkov zavtrashnego dnya* [The Core Competence of the Corporation]. Moscow, Olimp-Biznes Publ., 2002, 288 p.

15. Tomson A. A. *Strategicheskiy menedzhment: Iskusstvo razrabotki i realizatsii strategii* [Strategic Management: The art of strategy development and implementation]. Moscow, YuNITI Publ., 1998, 576 p.

16. Erygin Y. V., Dzhezhora A. A. [Strategic planning at DIC machine-building enterprises (defends industrial complex): the problems of a school choice]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii.* 2007, No. 1. P. 35–44 (In Russ.).

© Фирулев О. В., Ерыгин Ю. В., 2015

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Авакумов Роман Владимирович – аспирант, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: ravakumov@yandex.ru.

Аврамчикова Надежда Тимофеевна – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avr-777@yandex.ru.

Алякрецкий Роман Викторович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Антамошкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: oleslav@mail.ru.

Антамошкина Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: e-lena-ant@mail.ru.

Антамошкина Ольга Александровна – научный сотрудник, лаборатория мониторинга леса, Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук; старший научный сотрудник, лаборатория биогеохимии экосистем, Сибирский федеральный университет. E-mail: sloa@mail.ru.

Аплеснин Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

Арзамаскина Анастасия Михайловна – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: stmadden@rambler.ru.

Башков Иван Валерьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Бежитская Екатерина Андреевна – магистр техники и технологии, старший преподаватель кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bezhitsk@mail.ru.

Бежитский Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bezhitsk@yandex.ru.

Беленький Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: Belenkiy@pstu.ru.

Беляков Геннадий Павлович – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры организации и управления наукоемкими производствами, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gpbelyakov@mail.ru.

Белякова Галина Яковлевна – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономики и управления бизнес-процессами, Институт управления бизнес-процессами и экономики, Сибирский федеральный университет. E-mail: belyakova.gya@mail.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.

Бойко Сергей Николаевич – директор НПК, филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – Научно-исследовательский институт космического приборостроения. E-mail: npk6@mail.ru.

Брезицкая Валерия Витальевна – младший научный сотрудник научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Власов Антон Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, директор ресурсного центра коллективного пользования «Космические аппараты и системы», Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vlasov.anton@gmail.com.

Воейкова Ольга Борисовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: olgavoeykova@yandex.ru.

Гильц Надежда Евгеньевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: negilts@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.

Гофман Павел Михайлович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: microsolt@mail.ru.

Двирный Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный специалист по выявлению и защите интеллектуальной собственности управления информационного обеспечения, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: dvirnyi@mail.ru.

Двирный Гурий Валерьевич – кандидат технических наук, инженер-испытатель второй категории, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: dg1802@mail.ru.

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент Военно-инженерного института, Сибирский федеральный университет. E-mail: dmitriev121074@mail.ru.

Драганюк Михаил Николаевич – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: midraganyuk@yandex.ru.

Драганюк Оксана Николаевна – студентка 4 курса, группа БФ12-01, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: don-oks@mail.ru.

Елфимова Марина Владимировна – кандидат технических наук, подполковник внутренних органов, заместитель начальника Сибирской пожарно-спасательной академии МЧС России, по учебной работе Сибирская пожарно-спасательная академия – филиал Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. E-mail: elfimova@mail.ru.

Ермолаев Роман Александрович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 370, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева».

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, первый проректор – проректор по образовательной деятельности, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Erygin@sibsau.ru.

Ерыгина Лилия Викторовна – доктор экономических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: erigina@mail.sibsau.ru.

Захаров Юрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный технологический университет; профессор кафедры технической физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yuzakharov@mail.ru.

Зеленская Татьяна Васильевна – доктор экономических наук, профессор, советник заместителя председателя Правительства Красноярского края, Правительство Красноярского края.

Зыков Владимир Михайлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; директор Испытательного центра Института неразрушающего контроля. E-mail: vmz@tpu.ru.

Иванов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Иванов Илья Андреевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ilyaiv92@gmail.com.

Ивасев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления качеством и сертификации, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Исаев Андрей Викторович – начальник сектора, филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – Научно-исследовательский институт космического приборостроения. E-mail: npk6@mail.ru.

Калинин Андрей Олегович – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: mpx_@mail.ru.

Карачёва Галина Александровна – аспирант, старший преподаватель кафедры организации и управления наукоемкими производствами, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yhalinka@yandex.ru.

Карпов Игорь Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Карцан Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Военного института, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Карцан Татьяна Игоревна – магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: karcan-ufms@mail.ru.

Катык Кирилл Владимирович – инженер по автоматизированным системам управления производством 1-й категории, ПО «Полет» – филиал ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева». E-mail: katyk_kv@mail.ru.

Клименко Дмитрий Викторович – аспирант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: srmitriy@gmail.com.

Ковалев Дмитрий Игоревич – магистр, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Колесник Валерий Васильевич – заместитель начальника цеха тепловой автоматики и измерений по эксплуатации, филиал ПАО «ОГК-2» – Красноярская ГРЭС-2, г. Зеленогорск. E-mail: balans78@inbox.ru.

Кононова Елена Сергеевна – аспирант, ассистент кафедры менеджмента организации, Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева. E-mail: elkask@rambler.ru.

Корец Михаил Анатольевич – старший научный сотрудник, международная лаборатория экофизиологии биогеоценозов криолитозоны, Институт леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук.

Косякин Сергей Владимирович – начальник отдела, филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – Научно-исследовательский институт космического приборостроения. E-mail: npk6@mail.ru.

Кочура Сергей Григорьевич – доцент, кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора по электрическому проектированию и системам управления космических аппаратов, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института космических исследований и высоких технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuznetsov@sibsau.ru.

Кузнецов Александр Борисович – начальник группы отдела материаловедения, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева».

Кузнецов Петр Анатольевич – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: forubox@yandex.ru.

Куимов Артемий Олегович – аспирант кафедры торгового дела и маркетинга, Сибирский федеральный университет.

Куимов Василий Васильевич – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры торгового дела и маркетинга, Сибирский федеральный университет; исполнительный директор, ассоциация «Сибирский научно-образовательный консорциум». E-mail: kuimov1945@mail.ru.

Куприянова Олеся Андреевна – инженер; Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kupriyanova1809@gmail.com.

Кухаренко Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – Научно-исследовательский институт космического приборостроения. E-mail: npk6@mail.ru.

Левко Валерий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, директор института космической техники, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: levko@sibsau.ru.

Лепешев Анатолий Александрович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Лосев Василий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Сибирский государственный технологический университет. E-mail: basilos@mail.ru.

Лукьянова Анна Александровна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента организации, Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева. E-mail: aaluk110@mail.ru.

Лютых Юрий Александрович – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой землеустройства и кадастры, Красноярский государственный аграрный университет.

Лячин Владимир Иванович – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kafedra701@yandex.ru.

Максимов Игорь Александрович – доктор технических наук, начальник отдела, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: maximov@iss-reshetnev.ru.

Максимов Юрий Викторович – аспирант; заместитель генерального директора по качеству, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: qmaximov@iss-reshetnev.ru.

Мартынов Василий Александрович – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: martynov.vasiliy@gmail.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

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.

Михин Петр Олегович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mkhnptr@gmail.com.

Морозов Егор Александрович – начальник управления информационного обеспечения, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: morozov@iss-reshetnev.ru.

Ольшанская Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: TVO66@rambler.ru.

Охорзин Владимир Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: okhorzin@mail.ru.

Панфилов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: crook_80@mail.ru.

Пасечник Кирилл Арнольдович – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kir.nik@mail.ru.

Пацков Андрей Владимирович – аспирант; инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: patskov@iss-reshetnev.ru.

Пацкова Елена Георгиевна – инженер, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: lenysik1404@mail.ru.

Пермяков Глеб Львович – аспирант кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail gleb.permyakov@yandex.ru.

Першакова Кристина Константиновна – младший научный сотрудник научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kleniks@mail.ru.

Попов Евгений Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: epopov@bmail.ru.

Потылицына Елена Николаевна – ассистент кафедры инженерной экологии, факультет машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Leonova_en@mail.ru.

Прокопович Дмитрий Алексеевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dmap@mail.ru.

Проскурнин Сергей Дмитриевич – первый заместитель главы администрации ЗАТО г. Железногорск, Администрация ЗАТО г. Железногорск. E-mail: proskurnin@adm k26.ru.

Раводина Дарья Владимировна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru

Рудь Сергей Николаевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mrgreywolfdx@gmail.com.

Рыжая Анна Андреевна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: bel_anutik@mail.ru.

Саунин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: telegin@sibsau.ru, 8-391-291-9071.

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.

Сердюк Роман Сергеевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dodgesrs@mail.ru.

Ситников Максим Николаевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kineru@mail.ru.

Смородинов Роман Витальевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: rs105826@gmail.com.

Смородинова Наталья Ивановна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: smr439@yandex.ru.

Сопов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Становов Владимир Вадимович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Сугак Евгений Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной экологии, факультет машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sugak@mail.ru.

Тасейко Ольга Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры инженерной экологии, факультет машиноведения и мехатроники, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: taseiko@gmail.com.

Таюрский Анатолий Иванович – доктор экономических наук, профессор, директор, Институт проблем непрерывного образования РАО. E-mail: naukaobr@mail.ru.

Телегин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Тестоедов Николай Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Тимохович Александр Степанович – кандидат педагогических наук, доцент кафедры безопасности информационных технологий, Институт информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: TAStepanich@yandex.ru.

Тимушев Сергей Федорович – доктор технических наук, заведующий кафедрой ракетных двигателей, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). E-mail: irico.harmony@gmail.com.

Толстой Дмитрий Анатольевич – аспирант, Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева; заместитель исполнительного директора, ассоциация «Сибирский научно-образовательный консорциум».

Трушкина Татьяна Владимировна – ассистент кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Трушников Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: trdimitr@yandex.ru.

Удод Любовь Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: luba@iph.krasn.ru.

Ушаков Анатолий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ushackov@mail.ru.

Федоров Леонид Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Федотов Дмитрий Валерьевич – инженер научно-исследовательского управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: fedotov.dm.v@gmail.com.

Фирулев Олег Владимирович – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru.

Хоменко Игорь Иванович – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com.

Шайхадинов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский федеральный университет. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Яскин Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, руководитель филиала, филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – Научно-исследовательский институт космического приборостроения. E-mail: npk6@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alyakritsky Roman Viktorovich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Antamoshkin Aleksandr Nikolaevich – Dr. Sc., professor, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: oleslav@mail.ru.

Antamoshkina Elena Aleksandrovna – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: e-lena-ant@mail.ru.

Antamoshkina Olga Alexandrovna – researcher of forest monitoring laboratory, V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS, senior researcher, biogeochemistry of ecosystems laboratory, Siberian Federal University. E-mail: sloa@mail.ru.

Aplesnin Sergei Stepanovich – Dr. Sc., head of Physics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: aplesnin@sibsau.ru.

Arzamaskina Anastasiya Mikhaylovna – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: stmadden@rambler.ru.

Avakumov Roman Vladimirovich – postgraduate student, Siberian State Technological University. E-mail: ravakumov@yandex.ru.

Avramchikova Nadezhda Timofeevna – Dr. Sc., Docent, professor of Finance and credit department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: avr-777@yandex.ru.

Bashkov Ivan Valer'evich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Belenkiy Vladimir Yakovlevich – Dr. Sc., professor, Welding Production and Technology of Constructional Materials department, Dean of Mechanical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: Belenkiy@pstu.ru.

Belyakov Gennadii Pavlovich – Dr. Sc., professor, professor of Organization and management of science intensive production department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: gpbelyakov@mail.ru.

Belyakova Elena Vladimirovna – Dr. Sc., Docent, head of Logistics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ev_belyakova@rambler.ru.

Belyakova Galina Yakovlevna – Dr. Sc., professor, professor of Economy and management of business department, Institute of management business-processes and Economics, Siberian Federal University. E-mail: belyakova.gya@mail.ru.

Bezhitskaya Ekaterina Andreevna – master of engineering and technology, senior lecturer, Informational economical systems department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: bezhitsk@mail.ru.

Bezhitskii Sergei Sergeevich – Cand. Sc., Docent, System analysis and operation research department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: bezhitsk@yandex.ru.

Brezitskaya Valeriya Vitaljevna – junior researcher of the office of scientific research, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Boyko Sergey Nikolaevich – Cand. Sc., director of a science-research complex, Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering. E-mail: npk6@mail.ru.

Dmitriev Dmitry Dmitrievich – Cand. Sc., Docent, Docent of Military Engineering Institute, Siberian Federal University. E-mail: dmitriev121074@mail.ru.

Draganiuc Mikhail Nikolaevich – Master's Degree student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: midraganyuk@yandex.ru

Draganyuk Oksana Nikolaevna – student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: don-oks@mail.ru.

Dvirniy Guriy Valeryevich – Cand. Sc., JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: dg1802@mail.ru.

Dvirniy Valery Vasilevich – Dr. Sc., professor, JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: dvirnyi@iss-reshetnev.ru.

Elfimova Marina Vladimirovna – Cand. Sc., lieutenant colonel of Internal Affairs, deputy chief of Siberian Fire and Rescue Academy for Academic Affairs, Ministry of extremely cases of Russian Siberian Fire and Rescue Academy, branch of St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia. E-mail: elfimova@mail.ru.

Ermolaev Roman Alexandrovich – Cand. Sc., deputy chief of the division № 370, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev".

Erygin Yuri Vladimirovich – Dr. Sc., professor, First vice-rector, vice-rector for academic affairs, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Erygin@sibsau.ru.

Erygina Lilia Viktorovna – Dr. Sc., professor, Dean of Engineering-economics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: erigina@mail.sibsau.ru.

Fedorov Leonid Yur'evich – postgraduate student, junior researcher, Siberian Federal University. E-mail: 1401-87@mail.ru.

Fedotov Dmitrii Valer`evich – engineer of RD department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: fedotov.dm.v@gmail.com.

Firulev Oleg Vladimirovich – postgraduate student of Finance and credit department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Oleg91krasrus@mail.ru.

Gilts Nadezhda Evgen'evna – Cand. Sc., Docent of Logistics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: negilts@mail.ru

Girn Aleksei Vasilyevich – Cand. Sc., Docent, Docent of Flying vehicles department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: girn007@gmail.com.

Gofman Pavel Mikhailovich – Cand. Sc., head of Automation technological processes department. Siberian State Technological University. E-mail: microsolt@mail.ru.

Isaev Andrei Viktorovich – head of sector, Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering.

Ivanov Ilia Andreievich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ilyaiv92@gmail.com, phone num.

Ivanov Vladimir Vasil'evich – Cand. Sc., JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev", deputy head of department. E-mail: ivanov@iss-reshetnev.ru.

Ivasev Sergei Sergeevich – Cand. Sc., Docent, Docent of Quality management and certification department, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Kalinin Andrey Olegovich – postgraduate student, Automation technological processes department, Siberian State Technological University. E-mail: mpx_@mail.ru.

Karacheva Galina Alexandrovna – postgraduate student, senior teacher of Organization and management of science intensive production department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yhalinka@yandex.ru.

Karpov Igor Vasil'evich – Cand. Sc., senior researcher, Siberian Federal University. E-mail: karpovsfu@mail.ru.

Kartsan Igor Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, chief of Military institute, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kartsan@sibsau.ru.

Kartsan Tatyana Igorevna – master of engineering, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: karcan-ufms@mail.ru.

Katyk Kirill Vladimirovich – first category engineer of automated systems of production management, PA "Polet" branch of FSUE. E-mail: katyk_kv@mail.ru.

Khomenko Igor Ivanovich – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: khomenko.igor.iv@gmail.com

Klimenko, Dmitrii, Viktorovich – postgraduate, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: srmitriy@gmail.com.

Kochura Sergey Grigor'evich – Cand. Sc., Docent, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev", deputy general designer of electrical engineering and control systems of spacecraft. E-mail: kochura@iss-reshetnev.ru.

Kolesnik Valery Vasiljevich – deputy manager of thermal instrumentation and control shop, branch of OJSC "OGK-2", Krasnoyarskaya GRES-2, Zelenogorsk. E-mail: balans78@inbox.ru.

Kononova Elena Sergeevna – postgraduate student, assistant of Management of organization department, Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev. E-mail: elkask@rambler.ru

Korets Mikhail Anatolyevitch – senior researcher of forest monitoring laboratory, V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS.

Kosyakin Sergey Vladimirovich – head of department, Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering.

Kovalev Dmitry Igorevich – Master's Degree student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kovalev.fsu@mail.ru.

Krushenko Genry Gavrilovich – Dr. Sc., professor, Chief research officer, Institute of Computational Modeling, SB RAS. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Kuimov Artem Olegovich – postgraduate student, Department of Trade business and marketing, Siberian Federal University.

Kuimov Vasily Vasil'evich – Dr. Sc., professor, Department of Trade business and marketing, Siberian Federal University, executive director of the Association "Siberian Research and Education Consortium". E-mail: kuimov1945@mail.ru.

Kukharenko Alexander Sergeevich – Cand. Sc., head researcher, Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering.

Kupriyanova Olesya Andreevna – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kupriyanova1809@gmail.com.

Kuznetsov Alexander Borisovich – Head of Group Division of Materials, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev".

Kuznetsov Petr Anatol'evich – assistant of Automation technological processes department, Siberian State Technological University. E-mail: forubox@yandex.ru.

Lepeshev Anatoly Aleksandrovich – Dr. Sc., lead researcher, Siberian Federal University. E-mail: alepeshev@yandex.ru.

Levko Valery Anatolevich – Dr. Sc., Docent, director of Institute of Space Technology, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: levko@sibsau.ru.

Losev Vasiliy Vladimirovich – Cand. Sc., Docent of Automation technological processes department, Siberian State Technological University. E-mail: basilos@mail.ru.

Lukyanova Anna Aleksandrovna – Dr. Sc., professor, head of Management of organization department, Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev. E-mail: aaluk110@mail.ru.

Lyachin Vladimir Ivanovich – Dr. Sc., professor, Head of Economics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Lyutykh Yuriy Aleksandrovich – Dr. Sc., professor, Head of Land Management and Cadastres department, Krasnoyarsk State Agricultural University.

Martynov Vasiliy Alexandrovich – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: martynov.vasiliy@gmail.ru.

Maximov Igor Aleksandrovich – Dr. Sc., head of department, JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: maximov@iss-reshetnev.ru.

Maximov Yuriy Viktorovich – postgraduate, deputy general director for quality, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: qmaximov@iss-reshetnev.ru.

Medvedev Aleksandr Vasilyevich – Dr. Sc., professor, System analysis and operational research department, Institute of Computer Science and Telecommunications, Reshetnev Siberian State Aerospace University.

Miheev Anatolii Egorovich – Dr. Sc., professor, head of Flying vehicles department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: michla@mail.ru.

Mikhin Petr Olegovich – postgraduate, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: mkhnptr@gmail.com.

Morozov Egor Alexandrovich – head of Information technology department, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: morozov@iss-reshetnev.ru.

Okhorzin Vladimir Afanas'evich – Dr. Sc., professor, professor of Applied mathematics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: okhorzin@mail.ru.

Olshanskaya Tatiana Vasil'evna – Cand. Sc., Docent, Welding Production and Technology of Constructional Materials department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: TVO66@rambler.ru.

Panfilov Ilia Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent of Systems Analysis and Operations Research department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: crook_80@mail.ru, phone num.

Pasechnik Kirill Arnol'dovich – engineer, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kir.nik@mail.ru.

Patskov Andrey Vladimirovich – postgraduate, engineer of department, JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: patskov@iss-reshetnev.ru.

Patskova Elena Georgievna – engineer, JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: lenysik1404@mail.ru.

Permyakov Gleb L'vovich – postgraduate student, Welding Production and Technology of Constructional Materials department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: gleb.permyakov@yandex.ru.

Pershakova Christina Konstantinovna – junior researcher of the office of scientific research, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kleniks@mail.ru.

Popov Eugene Aleksandrovich – Dr. Sc., professor, professor of System analysis and operation research department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: epopov@bmail.ru.

Potilitsyna Elena Nikolaevna – assistant of Environmental Engineering department, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Leonova_en@mail.ru.

Prokopovich Dmitry Alekseevich – Cand. Sc., Docent of Logistics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: dmap@mail.ru.

Proskurnin Sergey Dmitrievich – the first Deputy head of administration of CATU Zheleznogorsk, CATU Zheleznogorsk Administration. E-mail: proskurnin@adm k26.ru.

Ravodina Daria Vladimirovna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Dashaorlova12@yandex.ru

Rud Sergey Nikolaevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: mrgreywolfdx@gmail.com.

Ryzhaya Anna Andreevna – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: bel_anutik@mail.ru

Saunin Viktor Nikolaevich – Cand. Sc., Docent, lead researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Senashov Sergey Ivanovich – Dr. Sc., professor, head of Information and economic systems department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sen@sibsau.ru.

Serduk Roman Sergeevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: dodgesrs@mail.ru.

Shaihadinov Aleksandr Anatol'evich – Cand. Sc., Docent, senior researcher, Siberian Federal University. E-mail: shaihadinov@mail.ru.

Sitnikov Maxim Nikolaevich – postgraduate student of Physics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: kineru@mail.ru.

Smorodinov Roman Vitalyevich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: rs105826@gmail.com.

Smorodinova Natalya Ivanovna – Cand. Sc., Docent, Docent of Finance and credit department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: smr439@yandex.ru.

Sopov Evgenii Aleksandrovich – Cand. Sc., Docent of Systems Analysis and Operations Research department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: evgenysopov@gmail.com.

Stanovov Vladimir Vadimovich – postgraduate student, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: vladimirstanovov@yandex.ru.

Sugak Evgeny Viktorovich – Dr. Sc., professor, professor of Environmental Engineering department, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: sugak@mail.ru.

Taseiko Olga Viktorovna – Cand. Sc., Docent of Environmental Engineering department, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: taseiko@gmail.com.

Tayursky Anatoly Ivanovich – Dr. Sc., professor, director of Institute of problems of continuous education of Russian Academy of Education. E-mail: naukaobr@mail.ru.

Telegin Sergey Vladimirovich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Testoedov Nikolay Alekseevich – Dr. Sc., associate member of RAS, professor, General director, JSC "Information satellite systems" named after academician M. F. Reshetnev". E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Timushev Sergei Fedorovich – Dr. Sc., Head of Rocket engine department, Moscow Aviation Institute (National Research University). E-mail: irico.harmony@gmail.com.

Timokhovitch Alexander Stepanovich – Cand. Sc., professor of Security of information technologies department, Institute of Informatics and telecommunications, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: TAStepanich@yandex.ru.

Tolstoy Dmitry Anatolyevich – postgraduate student, Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V. P. Astafiev, Deputy Executive Director of the Association "Siberian Research and Education Consortium".

Trushkina Tatiana Vladimirovna – assistant of Flying vehicles department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Trushnikov Dmitriy Nikolaevich – Cand. Sc., senior researcher, Welding Production and Technology of Constructional Materials department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: trdimitr@yandex.ru.

Udod Lubov Biktorovna – Cand. Sc., Docent of Physics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University, research assistant of Kirensky Institute of Physics, SB RAS. E-mail: luba@iph.krasn.ru.

Ushakov Anatoly Vasil'evich – Cand. Sc., Docent, senior researcher, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: ushackov@mail.ru.

Vlasov Anton Yur'evich – Cand. Sc., Docent, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: vlasov.anton@gmail.com.

Voeykova Olga Borisovna – Cand. Sc., Docent of Finance and credit department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: olgavoeykova@yandex.ru.

Yaskin Yuri Sergeevich – Cand. Sc., director of the branch, Branch of United Rocket and Space Corporation Institute of Space Device Engineering.

Zakharov Yuriy Vladimirovich – Dr. Sc., professor, head of Physics department, Siberian State Technological University; professor, of applied Physics department, Reshetnev Siberian State Aerospace University. E-mail: yuzakharov@mail.ru.

Zelenskaya Tatyana Vasiljevna – Dr. Sc., professor, adviser of deputy chair of Krasnoyarsk region government, Krasnoyarsk region government.

Zykov Vladimir Mikhailovich – Dr. Sc., Physical methods and quality control department, senior research officer, National Research Tomsk Polytechnic University. E-mail: vmz@tpu.ru.